



BTU

Brandenburgische Technische Universität Cottbus

SCHRIFTENREIHE STAHLBAU

2003

Experimentelle Untersuchungen der im Stahlbau typischen Bauteile mit Thermovision

L. Horváth

Heft 2

Experimentelle Untersuchungen der im Stahlbau typischen Bauteile mit Thermovision

Von der Fakultät Architektur, Bauingenieurwesen und Stadtplanung
der Brandenburgischen Technischen Universität Cottbus
zur Erlangung des akademischen Grades eines Doktor-Ingenieurs
genehmigte Dissertation

vorgelegt von Diplom-Ingenieur
 László Horváth
 aus Győr (Ungarn)

Erstgutachter: Prof. Dr.-Ing.habil. H. Pasternak
Gutachter: Prof. DrSc. M. Iványi
Gutachter: Prof. DSc. M. Skaloud

Tag der Disputation: 05.12.2002

Vorwort

Die thermografische Spannungsanalyse gehörte schon seit langem zu meinen Interessengebieten. Am Lehrstuhl für Stahlbau der Technischen Universität Budapest, Ungarn, bestand im Jahre 1993 für einen kurzen Zeitraum die Möglichkeit ein Thermovisionssystem zu nutzen. Der Untersuchungszeitraum war zeitlich sehr begrenzt und nur für einige einfache Experimente genügend. Eine weitere Möglichkeit für die Forschung in diesem Bereich bot die im Jahr 1995 begonnene Zusammenarbeit zwischen dem Lehrstuhl für Stahlbau der Brandenburgischen Technischen Universität Cottbus und der TU Budapest.

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner mehrmaligen Forschungsaufenthalte am Stahlbaulehrstuhl der BTU Cottbus. Die Versuche und die FE-Berechnungen wurden dort durchgeführt und die Auswertung der Ergebnisse teilweise in Budapest.

Herrn Professor Dr.-Ing. habil. H. Pasternak, dem Inhaber des Lehrstuhls, danke ich recht herzlich für die Betreuung dieser Arbeit sowie für seine intensive Unterstützung in allen Phasen.

Herrn Prof. Dr. Sc. M. Iványi (Lehrstuhl für Brücken und Tragwerke der Technischen und Wirtschaftswissenschaftlichen Universität, Budapest, Ungarn, ehemaliger Lehrstuhl für Stahlbau) danke ich sehr für die hilfreiche Unterstützung meiner Arbeit.

Weiterhin möchte ich mich an dieser Stelle bei allen Kollegen bedanken, die mich bei meiner Arbeit unterstützten. Mein besonderer Dank gilt Herrn Dipl.-Ing. W. Engst für die Hilfe bei der Versuchsdurchführung und den Herren Dipl.-Ing. S. Schilling und R. Kocker für die wertvolle Hilfe bei der FE-Analyse .

Ich danke dem Ministerium für Wissenschaft, Forschung und Kultur des Landes Brandenburg für die finanzielle Förderung eines Teils dieses Forschungsvorhabens.

Kurzfassung

Die thermoelastische Spannungsanalyse hat in den letzten 20 Jahren erhebliche Verbreitung im Bereich der zerstörungsfreien experimentellen Methoden gefunden. Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wurde die Anwendbarkeit des Infrarotmessverfahrens mit Hilfe einer konventionellen Thermokamera zur Beurteilung und Überwachung des Tragverhaltens von typischen Konstruktionsteile im Stahlbau untersucht.

Am Anfang werden in kurzen Worten die Grundlagen der thermoelastischen Spannungsanalyse zusammengefasst, die Vor- und Nachteile geschildert.

Ein Messverfahren wurde entwickelt, das mit dem am Lehrstuhl für Stahlbau der BTU Cottbus vorhandenen AGEMA System experimentelle Untersuchungen für die thermoelastische Spannungsanalyse ermöglicht. Das Messverfahren wird detailliert beschrieben und die einzelnen Vorgehensschritte erläutert.

Durch diese Experimente wurde das Messverfahren bestätigt. Im ersten Schritt sind drei ausgewählte Bauteile (gelochter Zugstab, ausgeklinkter Träger und Blechträger mit sehr schlankem Steg) mit besonderen Rissgefährdung untersucht worden. Im zweiten Schritt wurde das Verfahren bei der Analyse eines komplizierten Konstruktionsdetails eingesetzt. Die Ergebnisse aus Thermovision wurden mit herkömmlichen DMS-Messungen und FEM-Berechnungen verglichen.

Anschließend werden die Erfahrungen zusammengefasst und bewertet, und Vorschläge zur Verbesserung und Weiterentwicklung gegeben.

Summary

Thermoelastic stress analysis (TSA) is one of the non-destructive experimental methods that have become available as common practice in the past twenty years. This work examines the applicability of the infra-red measurement methods to the assessment of behaviour and structural state of elements typical in today's steel construction.

First, a brief summary is provided about the basic principles, advantages and disadvantages of TSA.

Second, a measurement method based on the TSA approach is elaborated, using the Agema 900 Thermovision System available at the Department of Steel Structures of BTU Cottbus. The measurement method is presented in detail, with explanations to each of the steps involved.

Third, the measurement method is justified on the basis of experiments. In the first stage, three selected structural elements (plate with a hole; necked girder; plated girder with a thin web plate) are examined, all of them highly sensitive to the presence of cracks. In the second stage, the measurement method is applied to a more sophisticated structural joint. The TSA results are compared to results based on traditional stress gauges and Finite Element Analysis.

Finally, conclusions are presented including main observations, evaluation of the methods of measurement, and suggestions for possible future enhancement.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
1.1	Zielsetzung	1
1.2	Prinzip der thermoelastischen Spannungsanalyse, Möglichkeiten und Grenzen	3
1.3	Theoretische Grundlagen	5
1.4	Historischer Rückblick und Stand der Forschung	7
2	Versuchstechnik	11
2.1	Wärmestrahlung und Thermovision	11
2.2	Versuchsaufbau, -vorbereitung und –durchführung	15
3	Auswertung der Ergebnisse	18
3.1	Thermobilder und Auswertungsmöglichkeiten mit AGEMA 900	18
3.2	Weiterverarbeitung der Differenzbilder	21
3.3	Umrechnung die Temperaturdifferenzen in Spannungen	23
4	Experimentelle Untersuchungen	26
4.1	Probekörper	26
4.2	Materialeigenschaften	26
4.3	Gelochter Zugstab	27
4.4	Ausgeklinkter Träger	38
4.5	Geschweißter Vollwandträger	50
4.6	Untersuchungen von Rosetten-Verbindungen	54
4.7	Tragverhalten im Versagenszustand	60
5	Zusammenfassung, Erfahrungen und Ausblick	65
	Literaturverzeichnis	68
	Anhang	72

1 Einleitung und Aufgabenstellung

1.1 Zielsetzung

Mit der Einführung der neuen Normengeneration (DIN 18800, Eurocode 3) ist zu erwarten, dass Stahlbauteile zunehmend unter Ausnutzung plastischer bzw. überkritischer Tragreserve bemessen werden. Bei der Bemessung darf vereinfachend von einer einmaligen Belastung ausgegangen werden, auch wenn die Konstruktion aufgrund ihres realen Verhaltens wiederholt bis in den plastischen bzw. überkritischen Bereich beansprucht wird. Diese in der bisherigen Praxis bewährte Vorgehensweise ist bei sog. „vorwiegend ruhender Belastung“ zulässig.

Im heutigen Stahlbau werden immer komplexere Konstruktionen benutzt. Einerseits führen architektonische Anforderungen oft zu schöneren, aber auch zu komplizierteren Details. Andererseits fordert die Wirtschaftlichkeit bessere Ausnutzung. Damit ergeben sich Spannungskonzentrationsbereiche in komplexen Tragstrukturen. Die Frage, ob die o.g. Berechnungsverfahren uneingeschränkt auf solch komplexe Stahlbauteile übertragen werden kann, führte z.B. zu Untersuchungen an ausgeklinkten Walzträgern unter zyklischer Beanspruchung [1], wobei die ersten Risse bei einer Belastung bis zur Gebrauchslast bereits nach wenigen Lastzyklen auftreten.

Die Vorhersage und Vermeidung derartiger Schädigungszustände ist Schwerpunkt für einen Bauingenieur. In der jüngsten Vergangenheit sind erhebliche Fortschritte sowohl bei experimentellen Untersuchungen als auch bei den rechnerischen Verfahren zur Bestimmung des Spannungszustandes in einem Bauteil erreicht. Die Analyse mit geometrisch und physikalisch nichtlinearen finiten Elementen ist bei solchen Bauelementen problematisch, und benötigt experimentelle Kontrolle und Kalibrierung. Die konventionellen experimentellen Spannungsanalyse-Techniken liefern dazu nicht immer zufriedenstellende Ergebnisse.

Herkömmliche Messungen der Dehnungen mit Dehnmess-Streifen (DMS) sind insbesondere bei flächenartigen Bauteilen sehr aufwendig. Sie liefern nur „lokale“ Ergebnisse und sind nur bis zu begrenzten Dehnungen nutzbar. Das berührungslose fotoelastische Messverfahren benötigt größere Vorbereitungen (Modellkörperanfertigung, Oberflächenbehandlung usw.).

Eine vielversprechende Alternative bietet die Spannungsanalyse mit Hilfe des Infrarotmessverfahrens. Belastungsabhängige Dehnungsänderungen eines Körpers rufen Temperaturänderungen hervor: Metalle kühlen unter Zugbeanspruchung ab und erwärmen sich unter Druckbeanspruchung. Durch die radiometrische Detektion der von der Oberfläche emittierten Wärmestrahlungen ist es möglich, die zugehörige Verteilung der Spannungen zu ermitteln. Das Verfahren basiert auf dem von Lord Kelvin 1853 untersuchten thermoelastischen Effekt [2].

In den Jahren 1980-82 wurde die erste hochempfindliche Infrarotkamera mit zugehörigen Analysatoren für Forschungszwecke eingesetzt. Das SPATE System stammt von der Firma OMETRON, und ist bis heute das meist verbreitete Gerät für thermoelastische Forschungen. Es besitzt eine sehr empfindliche Infrarotkamera mit einer guten optischen Auflösung und einer speziellen Analysatoreinheit. Damit wird eine Temperaturauflösung bis $\Delta T = 10^{-3}$ Kelvin erreicht. Bei experimentellen Forschungen im Rahmen der thermoelastischen Spannungsanalyse (TSA) wurden fast ausschließlich das SPATE System benutzt. Das Gerät hat aber einen Nachteil, die Investitionskosten sind sehr hoch. Dagegen ist in vielen Fällen oft nur eine konventionelle Infrarotkamera vorhanden, beispielsweise verfügt der Lehrstuhl für Stahlbau der Brandenburgischen Technischen Universität Cottbus über eine AGEMA 900 Thermovisionskamera.

Die thermoelastische Spannungsanalyse (TSA) wurde erstmals in der Luftfahrtindustrie und Automobilindustrie [7] erfolgreich benutzt. Die dort gemachten Erfahrungen können aber nicht ohne weiteres auf den Stahlbau übertragen werden, wegen den größeren Verformungen, anderen Belastungsstrukturen usw.

Hieraus ergeben sich die Aufgaben für diese Arbeit:

1. Ist eine konventionelle Infrarotkamera mit einfacher Analysatoreinheit für TSA geeignet? Es soll ein Messverfahren entwickelt werden, das mit dem vorhandenen AGEMA System experimentelle Untersuchungen mit thermoelastischer Spannungsanalyse ermöglicht.
2. Kann TSA im Stahlhochbau benutzt werden? Es soll die Anwendbarkeit des Infrarotmessverfahrens mit Thermovision zur Beurteilung und Überwachung des Tragverhaltens von typischen Konstruktionsteile im Stahlbau untersucht werden.

Zunächst werden in kurzen Worten die Grundlagen der TSA zusammengefasst, die Vor- und Nachteile geschildert.

Dann wird das Messverfahren detailliert beschrieben, und die einzelnen Schritte werden erläutert.

Das Messverfahren wurde durch Experimente bestätigt. Im ersten Schritt wurden drei ausgewählte Bauteile (gelochter Zugstab, ausgeklinkter Träger und Blechträger mit sehr schlankem Steg) mit besonderen Rissgefährdung untersucht. Im zweiten Schritt wurde das Verfahren bei der Analyse eines komplizierten Konstruktionsdetails eingesetzt. Die Ergebnisse aus Thermovision wurden mit herkömmlichen DMS-Messungen und FEM-Berechnungen verglichen.

Anschließend werden die Erfahrungen zusammengefasst und bewertet, und Vorschläge zur Verbesserung und Weiterentwicklung gegeben.

1.2 Prinzip der thermoelastischen Spannungsanalyse, Möglichkeiten und Grenzen

Es ist seit langem bekannt, dass Gase sich unter Druckanstieg erwärmen. Sie kühlen ab, wenn der Druck abnimmt. Das gleiche Prinzip ist auch für feste Körper gültig, Spannungsänderungen verursachen eine Temperaturänderung, aber die Temperaturdifferenzen sind sehr klein. Die Temperaturänderungen infolge Zugspannungen bei einer Zugprobe aus Stahl zeigt Bild 1.1.

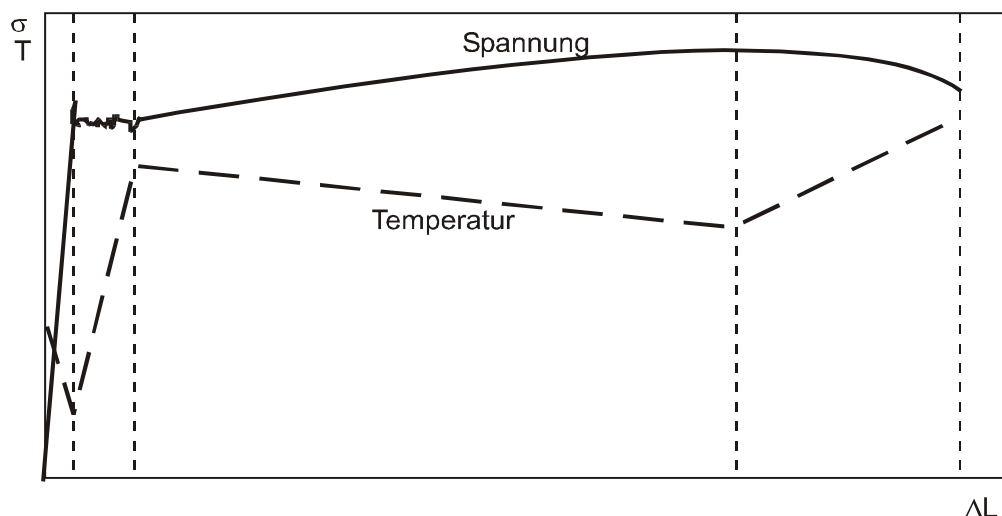


Bild 1.1 Temperaturänderungen bei einer Zugprobe

Ein Körper, der bei dynamischer Belastung Zug- und Druckspannungen bis zur Elastizitätsgrenze ausgesetzt ist, erfährt eine Umwandlung zwischen mechanischer und thermischer Energie. Die Temperaturänderung in einem homogenen, isotropen elastischen Material infolge zyklischer Spannungsänderung unter adiabatischen Bedingungen ist proportional der Änderung der Hauptspannungssumme. Die klassische Grundgleichung lautet:

$$\Delta T = -\frac{\alpha}{\rho \cdot c_p} \cdot T \cdot \Delta(\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3) \quad (1.1)$$

mit

T	absolute Temperatur [K]
α	linearer Wärmeausdehnungskoeffizient
c_p	spezifische Wärmekapazität bei konstanter Spannung
ρ	Werkstoffdichte
$\Delta(\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3)$	Änderung der Hauptspannungssumme [N/mm ²]

Diese Gleichung wurde erstmals von William Thompson (später Lord Kelvin) 1853 [2] veröffentlicht, und wird auch als thermoelastischer Effekt bezeichnet.

Bei bekannter Temperaturänderung liefert Gl.(1.1) nur die Summe der Hauptspannungen. Die Separation in einzelne Spannungskomponenten ist im allgemeinen Fall nicht einfach, benötigt weitere Berechnungen und/oder experimentelle Techniken und setzt sehr genaue und rauscharme Messergebnisse voraus. Bereiche mit reinen Schubspannungen bleiben (in ebenem Spannungszustand wegen $\sigma_1 = -\sigma_2$) unentdeckt.

Die Spannungsänderung muss so schnell erfolgen, dass sich eine adiabatische Zustandsänderung einstellt. Unter experimentellen Verhältnissen kann man dies nur soweit annähern, dass nur ein vernachlässigbar kleiner Anteil der thermoelastisch erzeugten Wärme abgeleitet wird.

Überschreiten die Spannungen die Fließgrenze, „verschwindet“ ein Teil der mechanischen Energie wegen der plastischen Deformationen in irreversiblen Volumenänderungen. Deshalb ist in diesem Bereich die Energieumwandlung nur mit Verlust möglich, und die Gl.(1.1) ist nicht mehr gültig. Diese Dissipation der Energie verursacht höhere Temperaturen, was zur Indikation der Steckgrenze benutzt werden kann.

Die größten Vorteile der thermoelastischen Spannungsanalyse sind:

- sehr schneller Versuchsablauf, nur wenige Vorbereitungen sind nötig,

- die Messung erfolgt kontaktlos, zerstörungs- und rückwirkungsfrei,
- die Ergebnisse sind in flächenhafter Form dargestellt, was besonders bei komplizierten Bauteilen sehr vorteilhaft ist.

Die größten Nachteile wurden schon oben erwähnt und basieren auf dem Grundprinzip:

- nur die Hauptspannungssummen werden geliefert,
- reine Schubspannungen können nicht erfasst werden,
- nur im elastischen Bereich können die Spannungen umgerechnet werden.

1.3 Theoretische Grundlagen

Eine detaillierte Herleitung der Gleichungen der linearen thermoelastischen Spannungsanalyse für anisotropes und isotropes Materialverhalten findet man in [3]. Eine Herleitung, die temperaturabhängige E-Module berücksichtigt, findet sich in [4],[5].

Hier wird nur eine kurze Herleitung der Grundgleichung (1.1) nach [6],[7] gezeigt.

Die Hauptspannungen an einem Volumenelement eines homogenen, linearen elastischen, isotropen Körpers setzen sich aus den mechanischen und thermischen Anteilen zusammen:

$$\begin{aligned}\sigma_x &= \lambda \cdot \varepsilon + 2 \cdot G \cdot \varepsilon_x - \frac{\alpha_L \cdot E \cdot \Delta T}{(1 - 2 \cdot \nu)} \\ \sigma_y &= \lambda \cdot \varepsilon + 2 \cdot G \cdot \varepsilon_y - \frac{\alpha_L \cdot E \cdot \Delta T}{(1 - 2 \cdot \nu)} \\ \sigma_z &= \lambda \cdot \varepsilon + 2 \cdot G \cdot \varepsilon_z - \frac{\alpha_L \cdot E \cdot \Delta T}{(1 - 2 \cdot \nu)}\end{aligned}\quad , \quad (1.2)$$

wobei

$$\lambda = \frac{\nu \cdot E}{(1 + \nu) \cdot (2 - \nu)}$$

Lamé-Konstante

$$G = \frac{E}{2 \cdot (1 + \nu)}$$

Schubmodul

$$\alpha_L$$

linearer thermischer
Ausdehnungskoeffizient

$$\varepsilon = \varepsilon_x + \varepsilon_y + \varepsilon_z$$

$$\sigma = \sigma_x + \sigma_y + \sigma_z$$

Durch Summierung der Gleichungen (1.2) bekommt man als Hauptspannungssumme:

$$\sigma = (3 \cdot \lambda + 2 \cdot G) \cdot \varepsilon - \frac{3 \cdot \alpha_L \cdot E \cdot \Delta T}{(1 - 2 \cdot \nu)}$$

$$\sigma = \left(\frac{3 \cdot E}{(1 - 2 \cdot \nu)} \right) \cdot (\varepsilon - \alpha_L \cdot \Delta T) \quad (1.3)$$

Eine Energiebetrachtung am Volumenelement liefert den 1. Hauptsatz der Thermodynamik in seiner allgemeinen Form:

$$\Delta Q = \Delta U + \Delta W \quad (1.4)$$

Erfolgt die dynamische Belastung ausreichend schnell, so kann eine reversibel adiabatische Zustandsänderung mit

$$\Delta U = -\Delta W \quad (1.5)$$

zugrunde gelegt werden. Das bedeutet, dass innerhalb des Betrachtungszeitraumes keine Wärme vom Volumenelement zu den Nachbarelementen hin abfließt.

$$\Delta \varepsilon = -\frac{C \cdot \Delta T \cdot (1 - 2 \cdot \nu)}{3 \cdot \alpha_L \cdot T \cdot E} \quad (1.6)$$

Wird (1.6) in (1.3) eingesetzt, so erhält man

$$\Delta \sigma = \left(\frac{3 \cdot E}{1 - 2 \cdot \nu} \right) \cdot \left(-\frac{C \cdot \Delta T \cdot (1 - 2 \cdot \nu)}{3 \cdot \alpha_L \cdot T \cdot E} - \alpha_L \cdot \Delta T \right) \quad (1.7)$$

Für die Temperaturänderung folgt:

$$\Delta T = -\Delta \sigma \cdot T \cdot \left[\frac{1}{\frac{C}{\alpha_L} + \frac{3 \cdot \alpha_L \cdot E \cdot T}{(1 - 2 \cdot \nu)}} \right] \quad \text{oder} \quad (1.8)$$

$$\Delta T = -\Delta \sigma \cdot T \cdot K_m \quad (1.9)$$

wobei

$$K_m = \left[\frac{1}{\frac{C}{\alpha_L} + \frac{3 \cdot \alpha_L \cdot E \cdot T}{(1 - 2 \cdot \nu)}} \right] \quad \text{thermoelastische Materialkonstante}$$

Unter Verwendung der Beziehungen

$$C = \rho \cdot C_V \quad \text{spezifische Wärmekapazität}$$

$$C_P = C_V + \frac{(3 \cdot \alpha_L)^2 \cdot T}{\chi \cdot \rho} \quad \text{Wärmekapazität bei konstanter Spannung}$$

$$\chi = \frac{3 \cdot (1 - 2 \cdot \nu)}{E} \quad \text{Kompressibilität}$$

lässt sich K_m vereinfacht darstellen

$$K_m = \frac{\alpha_L}{\rho \cdot C_P} \quad (1.10)$$

und (1.10) in (1.9) ergibt sich

$$\Delta T = - \frac{\alpha_L \cdot \Delta \sigma \cdot T}{\rho \cdot C_P} \quad (1.11)$$

Für Stahl sind in der Literatur (z.B. [3],[6]) folgende Kennwerte zu finden:

$$\alpha_L = 1.19 \cdot 10^{-5} \quad K^{-1}$$

$$\rho = 7860 \quad kg/m^3$$

$$C_P = 456 \quad J/kg \cdot K$$

$$K_m = 3.32 \cdot 10^{-6} \quad (N/mm^2)^{-1}$$

1.4 Historischer Rückblick und Stand der Forschung

Erste Hinweise auf eine Temperaturänderung infolge Zugspannung gab *Gough* [8] (1805). Die Observation von *Weber* [9] (1830) war die erste Meldung von Spannungsänderung verursachten Temperaturänderungen in Metallen. Die theoretische Basis des thermoelastischen Effekts hat *William Thompson* (später *Lord Kelvin*) 1853 begründet [2]. Seinen eigentlichen Ursprung hat das Verfahren der thermoelastischen Spannungsanalyse in den Nachmessungen von *Joule* [10] (1859) und *Haga* [11] (1882). Sie kontrollierten experimentell die theoretischen Folgerungen von *Lord Kelvin*.

Die erste Anwendungen des Verfahrens der experimentellen Spannungsanalyse und Materialprüfung stammen vom Anfang des 20sten Jahrhunderts. *Turner* [12] (1902) berichtet über Spannungsmessungen in großer Bauteilen mit der Benutzung des thermoelastischen Effektes. *Cooker* und *McKergow* [13] (1904) bestimmten die Spannungsverteilung in einem Biegebalken mit Hilfe dieses Verfahrens.

Im Jahr 1915 konstruierten *Compton* und *Webster* ein sehr genaues Temperaturmessgerät, mit dem sie sich den Berechnungen von *Kelvin* bis auf 0,1% näherten [14].

Tamman und *Warrentrup* [15] (1937) führten eine Serie von Experimenten mit verschiedenen Metallen - Kupfer, Nickel, Stahl - durch. Sie zeigten, dass im elastischen Bereich ein Körper, der bei dynamischer Belastung Zug- und Druckspannungen ausgesetzt ist, eine reversible Umwandlung zwischen mechanischen und thermischen Energieformen erfährt. Im plastischen Bereich kann die fehlende Energie, die durch die plastischen Verformungen nicht mehr reversibel ist, zur Indikation der Streckgrenze benutzt werden. Im Jahre 1950 führten *Rocca* und *Bever* [16] weitere Experimente mit Nickel und Eisen durch.

Belgen nutzte 1967 das erste Mal einen Infrarotdetektor [17] zur Messung der spannungsproportionalen Temperaturänderungen in einem schwingenden Biegebalken und zur Herleitung der Spannungsamplituden. Die praktische Anwendung des Infrarotmessverfahrens auf diesem Gebiet begann 1978, und bekam mit der Erscheinung des kommerziellen SPATE Systems in 1982 einen großen Aufschwung. Der größte Teil der Untersuchungen fällt allerdings in die letzten 15 Jahre.

Eine detaillierte Darstellung der thermoelastischen Spannungsanalyse und deren Anwendungsgebiete bietet [18]. Eine kürzere Zusammenfassung und einige Anwendungsbereiche werden in [19] vorgestellt.

Das Messverfahren findet erste industrielle Anwendungen im Flugzeug- und Fahrzeugindustrie [6],[7].

Das Verfahren wurde in den Untersuchungen bei Ermüdungsproblemen benutzt. Harig und Müller [20] haben beispielweise die Temperaturänderungen bei gekerbten Stahlproben mit Thermoelementen gemessen, und mit Hilfe des thermoelastischen Effektes das zyklische Verformungsverhalten genauer untersucht. Schlicht und die Mitverfasser [21] nutzten das SPATE-System zum Detektieren der Schädigungen an einem Rohrsegment mit einer in Längsrichtung durchgehenden Schweißnaht. Mit der Differenzanalyse zweier Messungen konnten die Spannungsanomalien und dadurch die Risse erkannt werden, obwohl die Analyse zwischen Berechnung und Messung nicht genau übereinstimmende Ergebnisse lieferte. Die Spannungsintensitätsfaktoren für Riss-Spitzen haben Stanley und Dulieu-Smith [22] aus thermoelastischen Daten hergeleitet.

Besonders große Bedeutung haben die Forschungen zur Ermittlung der einzelnen Spannungskomponenten aus der gemessenen Hauptspannungssumme. Dabei wurden numerische und rein experimentelle Verfahren entwickelt.

Stanley [23], Ryall und Wong [24] berichteten über die erste Ergebnisse für spezielle Fälle. Huang hat ein hybrides Verfahren entwickelt, und mit seinen Mitverfassern an einer Reihe von Anwendungen, z.B. [25], [26] getestet. Das Verfahren von Huang benötigt einen freien Rand, und ist sehr empfindlich auf das Geräusch der Messergebnisse. Rauch und Rowland haben Methoden für die Verfeinerung der Messergebnisse veröffentlicht, wobei in [27] aus bekannten Daten verbesserte Werte für die Randbereiche bestimmt werden können (Inverses Problem). In [28] haben sie ein anderes Filterverfahren gezeigt.

Bei den rein experimentellen Verfahren handelt es sich um ein speziell gestaltetes Messstück, das auf der Probeoberfläche kraftschlüssig befestigt ist. Dort werden statt der Verformungen des Probestückes nur die Verformungen des Messstückes mit Hilfe des Infrarotmessverfahrens gemessen. Dieses streifenförmig gestaltetes Messstück liefert nur die Spannungen in der Längsrichtung – ähnlich wie die herkömmlichen Dehnungsmessstreifen. Feickert [3] studierte grundsätzlich die numerische und experimentelle Methode für die Bestimmung der Spannungskomponenten. Er hat ein numerisches Verfahren für Platten hergeleitet, und eigene Untersuchungen mit dem Streifen-Verfahren und mit Dehnungsmessfolien durchgeführt, die Verfahren detailliert beurteilt, und Hinweise für die Benutzung gegeben. Stanley und Dulieu-Smith [29] fanden weitere Möglichkeiten – mehrere Streifen nebeneinander, Streifen-Rosette – und haben die Anwendung an einem Zugstab gezeigt. Der größte Nachteil dieses experimentellen Verfahrens ist, das die Abmessungen des Messstückes relativ klein sein sollen, und das benötigt wieder sehr genaue Messwerte.

Die anisotropen Materialien können auch mit der thermografischen Spannungsanalyse untersucht werden. Zhang und die Mitverfasser [30] analysierten die thermischen Effekte und Einflussfaktoren bei einem Verbundmaterial. Feng [31] und Kollegen versuchten die Spannungssparation bei Verbundmaterialien durchzuführen.

Die thermoelastische Spannungsanalyse wurde auch unter sehr speziellen Bedingungen eingesetzt. Eine Anwendung an heißen Bauteilen

zeigt [32]. Der Einfluss der nichtadiabatischen Bedingungen wurde in [33] analysiert und [34] berichtet vom Einsatz unter zufallsbestimmter Belastung.

Bei den Forschungsaktivitäten wurde fast ausschließlich das SPATE System benutzt. Obwohl andere kommerzielle Thermovisionsgeräte auch gute Systemspezifikationen anbieten, stellt sich die Frage, ob sie für thermografische Untersuchungen geeignet sind.

Drdácky et al. [35] benutzte das Verfahren für experimentelle Untersuchungen an einem Blechträger mit gelochtem Steg. Die Beanspruchbarkeit von Baustählen bei verschiedenen Spannungskonzentrationen (Schweißnähte, V-Kerben) wurde in [36] untersucht. Es sollte grundsätzlich untersucht werden, mit welchen Grenzen das TSA-Verfahren im Stahl(hoch)bau angewandt werden kann.

Ein erster Bericht über die hier durchgeführten Untersuchungen erschien in der Zeitschrift Stahlbau [37].

2 Versuchstechnik

2.1 Wärmestrahlung und Thermovision

Gaussorgues [40] bietet eine vollständige und sehr ausführliche Abhandlung der infraroten Thermografie, der Messtechnik, Anwendungsbereiche usw an.

Die thermographische Spannungsanalyse ist ein berührungsloses Messverfahren. Die zyklische Belastung verursacht im Probekörper eine Temperaturänderung, demzufolge emittiert die Oberfläche des Körpers eine entsprechende Wärmestrahlung. Der größte Teil diese Strahlung wird im Wellenlängenbereich zwischen 0,7 und 30 μm emittiert. Dieser Bereich wird nach seiner spektralen Lage entsprechend als Infrarot -Bereich bezeichnet. (Bild 2.1)

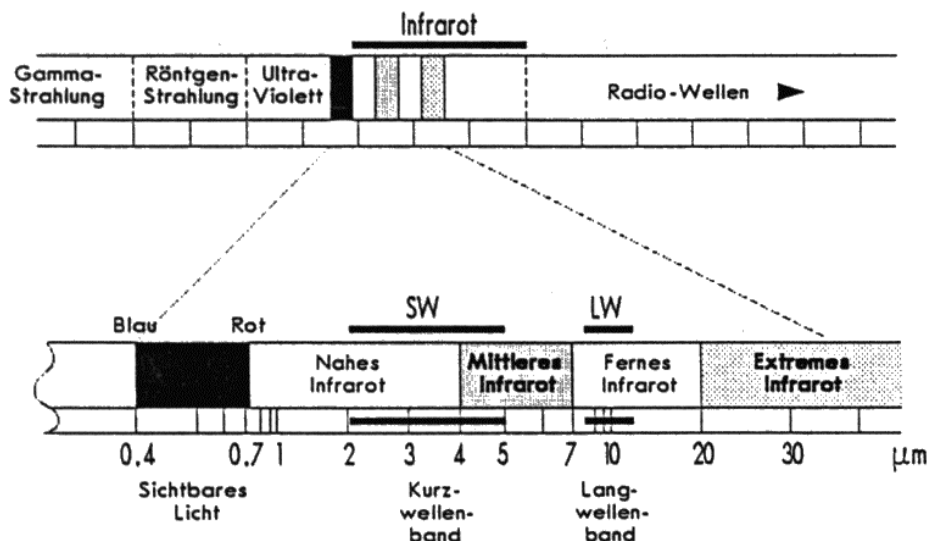


Bild 2.1 Lage der Infrarot-Strahlung im elektromagnetischen Spektrum und Aufteilung in Unterbereiche (nach [38])

Diese Strahlung wird zur Messung der Temperaturverteilung kontaktlos durch einen Infrarot-Sensor detektiert. Weil der Detektor über größere Entfernung eingesetzt wird, treten auch atmosphärische Störeffekte auf. Bild 2.2. zeigt die spektrale Transmission der Atmosphäre, wo sich einige Bereiche wegen geringer Dämpfung der Wärmestrahlung für die Infrarot-Messungen besonders eignen. Man spricht von den 'Atmosphärischen Fenstern', die im nahen Infrarot (1-2 μm), im mittleren Infrarot (3-5 μm) und im fernen Infrarot (8-14 μm) liegen und auch in Bild 2.1 als Wellenbänder abgebildet sind.

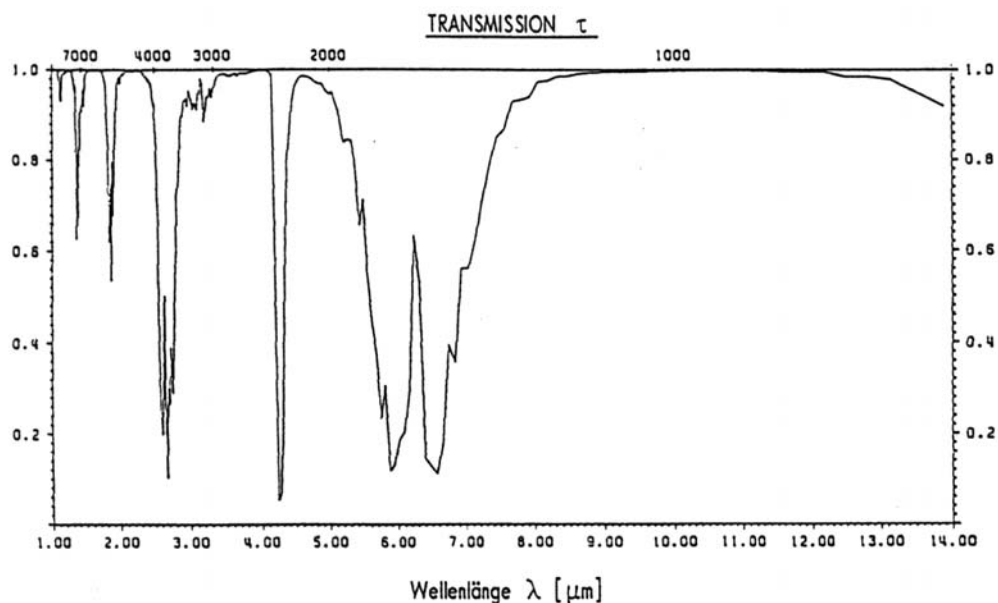


Bild 2.2 Spektrale Transmission der Atmosphäre (nach [38])

Die Detektoren sind nicht im ganzen IR-Bereich gleichmäßig sensitiv, sondern zeigen nur eine hohe Sensitivität in einem der oben genannten 'Fenster'. Nach dem Planck'schen Strahlungsgesetz sieht man, dass die Strahlungsmaxima bei geringer Temperatur im fernen IR-Bereich liegen. Deshalb sind die LW-Detektoren von $+100^{\circ}\text{C}$ bis zirka -20°C am effektivsten nutzbar, und für größere Temperaturen (bis $1000\text{--}1200^{\circ}\text{C}$) sind die SW-Detektoren leistungsfähiger.

Ein komplettes Infrarotsystem besteht nicht nur aus dem Detektor selbst, sondern umfasst auch angepasste andere Komponenten (Bild 2.3).

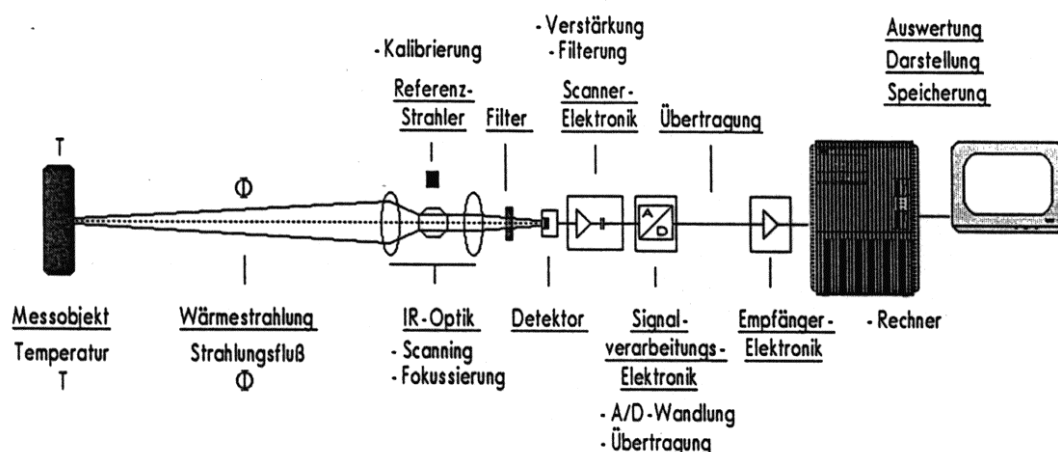


Bild 2.3 Komponenten eines Infrarot-Mess-Systems (nach [38])

Die von der Oberfläche des belasteten Probekörpers emittierten Wärmestrahlung wird in der Infrarotkamera (Scanner) durch eine speziellen IR-Optik auf den Infrarotdetektor fokussiert (Bild 2.4). Der Detektor selbst hat nur die Aufgabe, IR-Strahlungsenergie zu absorbieren und in ein Mess-Signal umzuwandeln, deshalb wird eine optomechanische Abtastvorrichtung benötigt, die das Bild - analog zu dem von der TV-Technik her bekannten Verfahren - mit Hilfe rotierender Spiegel horizontal und vertikal abtastet und die Bildinformation seriell aufnimmt. In der Kamera wird außerdem das temperaturabhängige Detektorsignal verstärkt, gefiltert und digitalisiert. Die Messwerte werden in den Rechner übertragen, wo die Aufnahmen dargestellt, gespeichert und ausgewertet werden können. Der ganze Prozess wird durch eine leistungsfähige Software kontrolliert und unterstützt.



Bild 2.4 Thermovisionskamera

Die Kamera benötigt eine starke und konstante Kühlung, weil der Detektor nur bei einer tiefen Temperatur (-170°C bis -200°C) die optimalen Eigenschaften vorzeigt. Das wird durch flüssigen Stickstoff erreicht.

Die erste Mess-Systeme gehörten zum militärischen Bereich, dann erschienen kommerzielle Infrarot-Systeme. Ein Teil davon sind spezielle TSA-Messgeräte (z.B. SPATE, JTG-8000). Im kommerziellen Bereich sind vor allem Infrarot-Kameras mit computergesteuerten Auswertungs- und Erfassungssystemen erhältlich. Die speziellen Geräte brauchen einen hohen Kapitalaufwand, und sind deshalb nur für größere Institute und Firmen erreichbar.



Bild 2.5 AGEMA 900 Thermovisionssystem

Der Lehrstuhl für Stahlbau an der BTU Cottbus besitzt ein AGEMA 900 Thermovisions System (Bild 2.5, 2.6). Das System ist für den Einsatz im Labor oder in der industriellen Umgebung konzipiert.

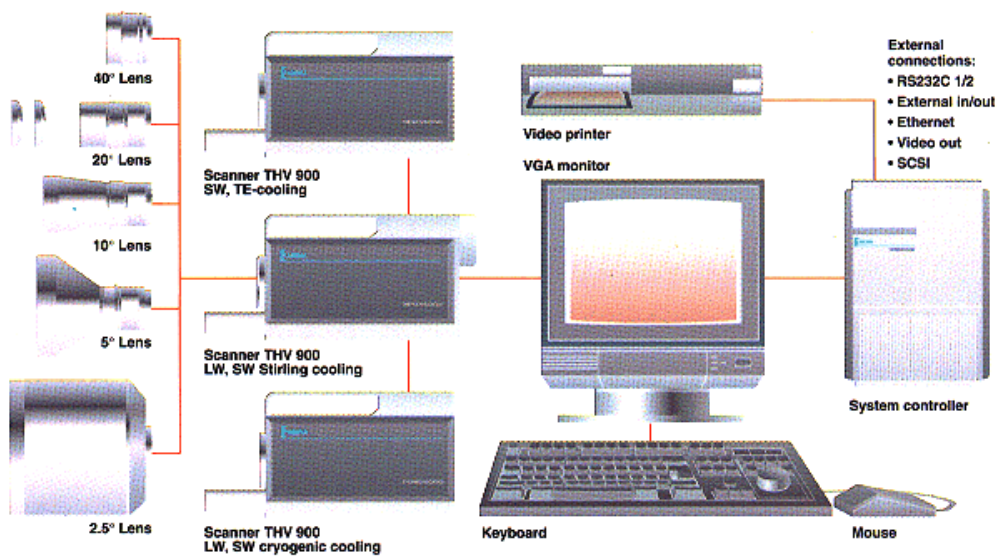


Bild 2.6 Systemkomponenten der AGEMA 900

Die einzelnen Komponenten und ihre wichtigsten technischen Daten sind folgende [39]:

- a., Objektiv: 20° , minimaler Fokus 60 cm
- b., Scanner: spektrale Empfindlichkeit 8-12 μm (LW)
 - Temperatur-Auflösung 0.08 °K
 - geometrische Auflösung 272 Zeilen / 136 Punkte pro Zeile
 - Kühlung LN_2 (stickstoffgekühlt)
- c., System Controller Computer
 - Digitalrechner mit OS9 Betriebssystem
 - Prozessor 2x68020 Motorola
 - ERIKA ver. 3.11. Systemsoftware
 - SuperVGA Bildschirm
 - SCSI BUS und schnelle Festplatten

2.2 Versuchsaufbau, -vorbereitung und –durchführung

Die Versuche wurden an der Forschungs- und Materialprüfanstalt (FMPA) der Brandenburgischen Technischen Universität Cottbus durchgeführt.

Die Versuchskörper wurden mit einer hydraulischen Prüfmaschine (TONI TECHNIK, Bild 2.7) zyklisch belastet.



Bild 2.7 Hydraulische Prüfmaschine

Alle Versuche wurden kraft geregelt durchgeführt, wobei ein trapezförmiger Last-Zeit-Verlauf gewählt wurde. Die Lastfrequenz sollte ausreichend hoch sein, um die adiabatischen Verhältnisse mit hinreichender Genauigkeit anzunähern. Die Belastungsfrequenz liegt bei der ersten Versuchsserie zwischen 0,5 Hz und 1 Hz, bei der Rosettenverbindung-Versuchen beträgt 2 Hz und 4 Hz. Bei allen Versuchen wurde die Last schwellend zwischen $F_0 \approx 0$ kN und F_i unterschiedlichen Lastniveaus aufgebracht. Die Festlegung des Lastniveaus orientierte sich an Gebrauchslasten, die aus der prognostizierten Traglast abgeleitet wurden.

Zur Vorbereitung der Probekörper gehört das Reinigen ihrer Oberfläche, und ein dünner Anstrich mit mattschwarzem Aerosollack, um die Oberflächenemission im Infrarotbereich zu verstärken, zu vereinheitlichen und ungewollte Reflexionen zu vermeiden.

Die Infrarotmessungen wurden mit Ergebnissen aus konventionellen Dehnungsmess-Streifen gegenübergestellt. Die DMS wurden in der Nähe dem projizierten Spannungskonzentrationsbereich angeordnet (Bild 2.8) und auf die Probekörperoberfläche aufgeklebt. Die Dehnungen wurden während der gesamten Versuchsdauer kontinuierlich aufgenommen, digital gespeichert und dann konventionell in Spannungen umgerechnet.

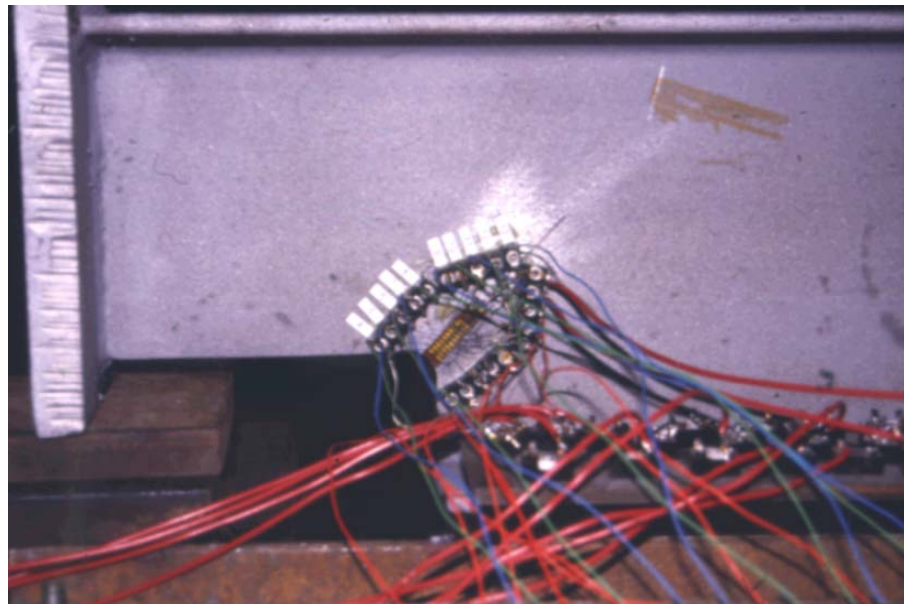


Bild 2.8 DMS am ausgeklinkten Träger

Gemessen wurden außerdem die aufgebrachte Last, die Durchbiegung in der Trägermitte, bzw. die Verlängerung des Probestückes. Dafür wurden digitale Wegaufnehmer und Kraftmessdosen verwendet. Alle Messdaten wurden direkt mit PC-s erfasst. Dazu diente das Programm DMC-LAB.

Die Versuche wurden mit geometrisch und physikalisch nichtlinearen Finiten Elementen nachgerechnet. Zur FEM-Berechnung wurde das Programm ABAQUS Vers. 5.4 benutzt, mit den MSC-PATRAN 3 Pre- und Postprozessoren. Die Berechnungen wurden an einer IBM RISC 6000 Workstation durchgeführt. Die FEM-Berechnungen wurden am Lehrstuhl für Stahlbau der Brandenburgischen Technischen Universität Cottbus durchgeführt.

3 Auswertung der Messergebnisse

3.1 Thermobilder und Auswertungsmöglichkeiten mit AGEMA 900

Die Wärmestrahlung der Probekörper wurde mit dem AGEMA 900 Thermovisions-System gemessen. Die Temperatur der Oberfläche des Versuchskörpers wird aus der detektierten IR-Strahlung ermittelt. Verschiedene Störeffekte müssen bei der Berechnung dieser Temperatur berücksichtigt werden. Die Strahlung wird auf dem Weg zum Detektor von der Atmosphäre und vom Objektiv gedämpft. Außerdem stammen Störstrahlungen aus der Umgebung und vom Objektiv selbst auch. Zur Erhöhung der Messgenauigkeit sind diese Effekte bei der Objekttemperatur-Berechnung zu berücksichtigen. Dazu dienen die Kalibrierung und verschiedene Kompensationsmethoden, die teilweise automatisch durchgeführt werden. Nach der Umwandlung des IR-Signals in Temperaturwerte ergibt sich ein Temperaturfeld, was am Bildschirm als Farbbild betrachtet (Bild 3.1) und zur weiteren Bearbeitung gespeichert werden kann.

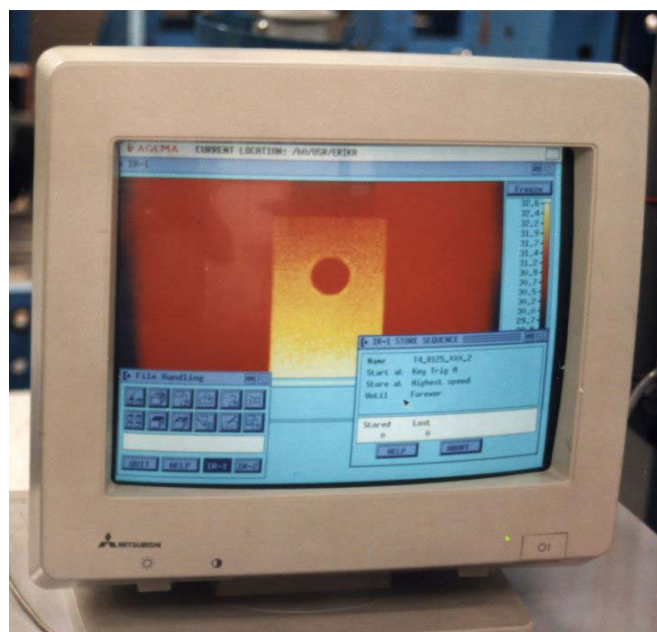


Bild 3.1 Thermobild am AGEMA Monitor

In den Versuchen wurden kontinuierliche Thermobildserien bei jeder Laststufe aufgenommen und gespeichert. Die Geschwindigkeit des AGEMA-Systems ermöglicht maximal 4-14 Thermoaufnahmen pro Sekunde. Wegen der zyklischen Belastung und der begrenzten Aufnahmegeschwindigkeit (Bild 3.2) repräsentieren diese Thermobilder verschiedene Punkte des Last-Zeit-Verlaufes.

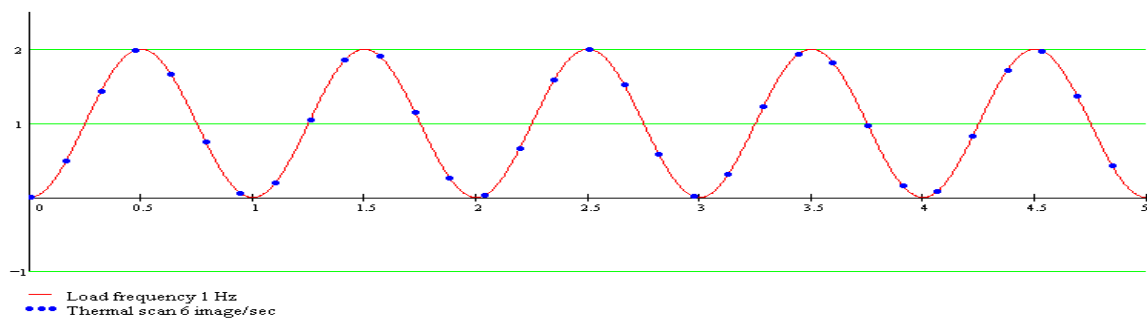


Bild 3.2 Last-Zeit-Verlauf und Thermoaufnahmen

Aus diesen Bildsequenzen wurden zuerst Bilder ausgefiltert, die innerhalb eines Lastzyklus bei der größten Last (Bild 3.3) aufgenommen wurden. Diese Bilder wurden wegen der Rauschunterdrückung gemittelt. Das Bild nennen wir MaxTempAufnahme. Analog wurde für diese Laststufe ein MinTempAufnahme erzeugt, das aus der bei der geringsten Last (Bild 3.4) aufgenommenen Thermoaufnahmen erstellt wurde.

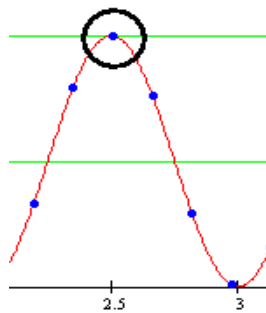


Bild 3.3 MaxTempAufnahme

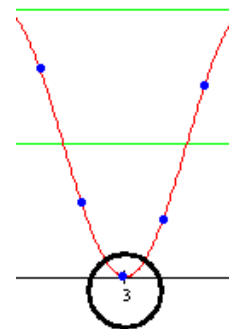


Bild 3.4 MinTempAufnahme

Durch Subtraktion von MaxTempAufnahme und MinTempAufnahme lässt sich ein Differenzbild erzeugen, das die Temperaturänderung innerhalb eines Lastzyklus zeigt. Die weitere Analyse basiert auf diesen Differenzbildern.

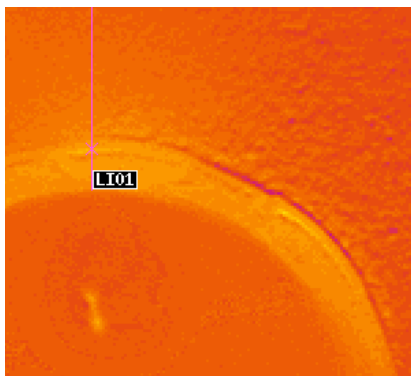


Bild 3.5 Punktmessung

Das Thermovisions-System bietet vielfältige Möglichkeiten zur Bearbeitung der Thermoaufnahmen. Mit der Punktmessungsfunktion kann man die Temperatur in einzelnen Bildpunkten (Bild 3.5) genau bestimmen. Die Messung entlang einer Linie ist sehr wichtig, um die Temperaturen beispielsweise in einem Riss genauer zu messen (Bild 3.6).

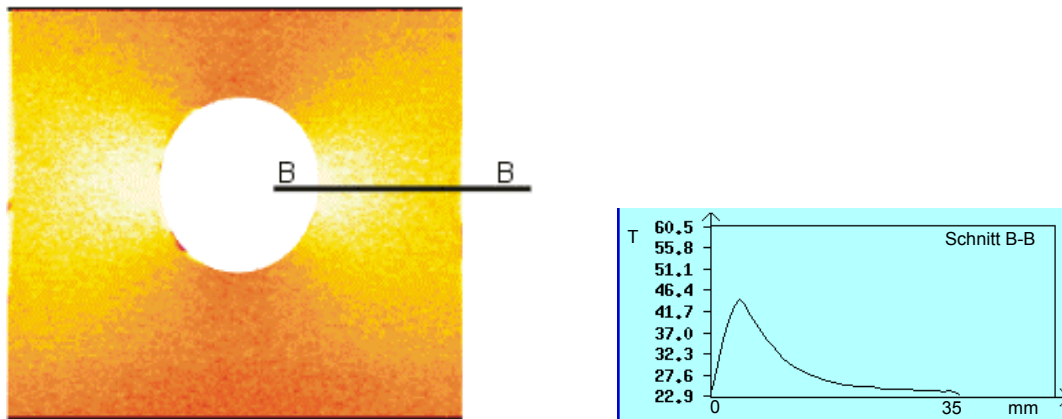


Bild 3.6 Temperaturen entlang der Messlinie B-B.

Die Systemfunktion Subtraktion ermöglicht die quantitative Bestimmung von Temperaturveränderungen. Damit lässt sich aus zwei Referenz-Bildern ein Differenz-Bild erzeugen. Eine Bild-Subtraktion setzt selbstverständlich voraus, dass beide Bilder geometrisch übereinstimmen. Wenn Referenzpunkte an beiden Bildern vorhanden sind, dann kann das System automatisch die Bilder anpassen. Deswegen wurden auf der Oberfläche des Versuchskörpers spezielle Punkte (Bild 3.7) eingerichtet, die durch den veränderten Wärmeemissionsgrad in den Thermobildern markant erscheinen.

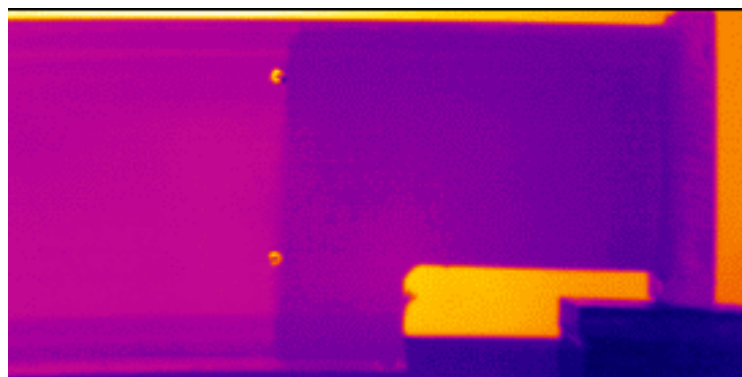


Bild 3.7 Referenzpunkte am Thermobild

Die größte Schwierigkeit bei der Auswertung war die Bestimmung, welche Bilder zu welchem Punkt des Last-Zeit-Verlaufs aufgenommen wurden. Die elektronische Verkoppelung des AGEMA-System mit der Steuerung der hydraulischen Prüfmaschine war bisher nicht möglich. Bei den ersten Versuchsserien haben wir das Zeitsignal für diesen Zweck benutzt. Die Thermobildserien enthalten den Zeitpunkt der Aufnahme, und zusammen mit der Lasthistorie war es möglich, die nötige Bilder herauszusuchen. Beim letzten Versuch benutzten wir einen thermischen Indikator, der im Thermobild (Bild 3.8) erscheint, und bei dem Lasthöhepunkt ein Wärmesignal ausgibt. Mit dieser Technik wurde eine genauere Filterung der Bilder möglich.

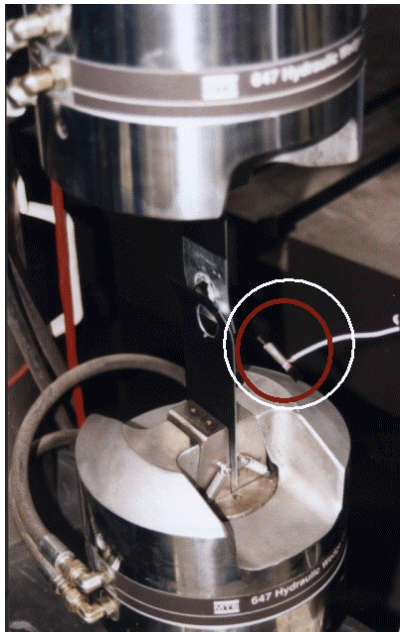


Bild 3.8/a Thermischer Indikator

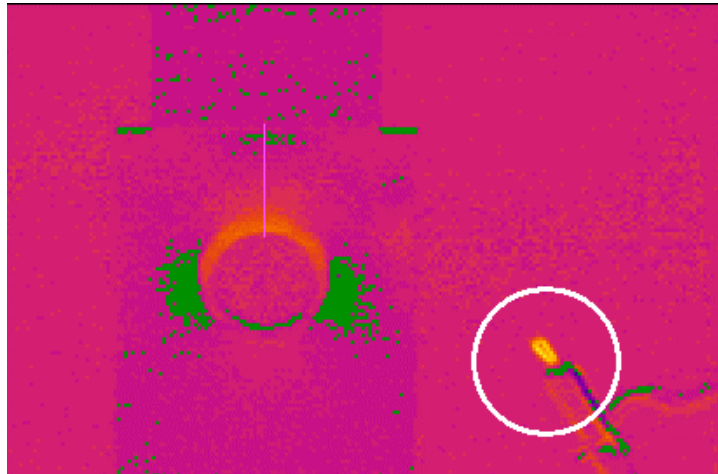


Bild 3.8/b Thermischer Indikator im Thermobild

3.2 Weiterverarbeitung der Differenzbilder

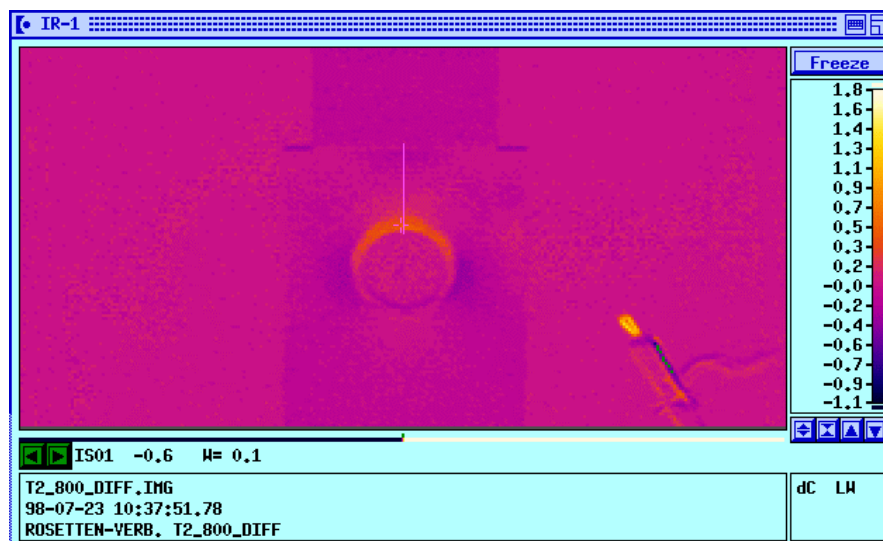


Bild 3.9 Differenzbild mit Farbskala

Die Differenzbilder zeigen (Bild 3.9) die Temperaturveränderungen der Oberfläche des Probekörpers als Farbbild. Jede Farbe entspricht einer Temperaturdifferenz. Die Zuordnung der Farben erfolgt automatisch. Wegen des durchgehenden Farbübergangs sind sie aber nicht einfach voneinander zu trennen.

Das AGEMA-System kann mit der eingebauten Isothermen-Funktion Bildpunkte mit Temperaturen innerhalb eines bestimmten Wärmebereiches in der Anzeige hervorheben. Die entsprechenden Bildpunkte werden eine auffällige Farbe haben. Die thermische Auflösung des Systems beträgt 0,1 K, aber diese Isotherme-Funktion kann das nicht darstellen.

Zur Weiterverarbeitung der Differenzbilder wurde ein Verfahren entwickelt. Das Thermovisions-System kann die Temperaturergebnisse in eine Datei speichern. Aus diesen Daten lassen sich mit einem einfachen Programm neue Bilder erzeugen. Dabei entspricht jeder Temperaturdifferenz von 0,1 K eine künstliche Farbe. Die Farben wurden so gewählt, dass sie voneinander gut trennbar sind. Bild 3.10 zeigt eine Thermoaufnahme mit dem zugehörigen Farbbild aus Differenzdaten. Die Temperaturbereiche können sehr einfach - durch Ein- und Ausschaltung – mit 0,1 K Auflösung beobachtet werden (Bild 3.10/c).

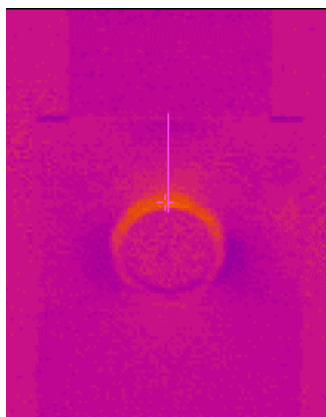


Bild 3.10/a
Differenzbild

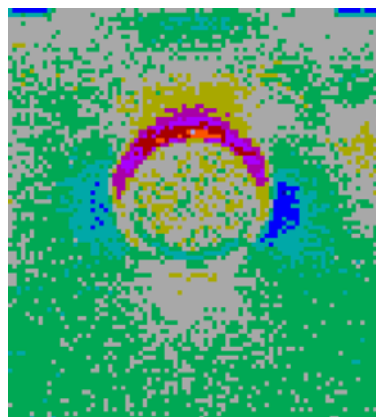


Bild 3.10/b Farbbild aus
Daten

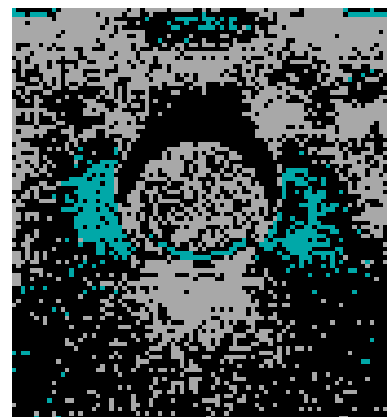


Bild 3.10/c Bereich mit
 $\Delta T = -0,2 \text{ K}$

Die Separierung der einzelnen Temperaturbereiche erfolgt am Anfang rein grafisch. Am Bildschirm kann man die Bereiche einfach umzeichnen.

Die hochentwickelten, automatischen Bildverarbeitungsmethoden ermöglichen die Bestimmung der Bereichsgrenzen. Die Methoden der Dilatation und Erodierung können zur Bestimmung der Grenzlinien des Probekörpers benutzt werden. Die grafischen Programme bieten spezielle Filter zum Finden der Bereichsgrenzen (sog. Edge Filter). Die Voraussetzung ist aber immer ein scharfes Bild, wo die einzelnen Bereiche gut voneinander abtrennbar sind. Diese Voraussetzung wurde leider nur bei einer Versuchsreihe erfüllt. Deshalb konnte nur eine Serie des Rosettenverbindungs-Experiments mit dieser Methode ausgewertet werden.

Das Bild 3.11 zeigt eine Nahaufnahme vom Rosettenflansch, und einige automatisch erstellte Bilder von separierten Thermobereichen.

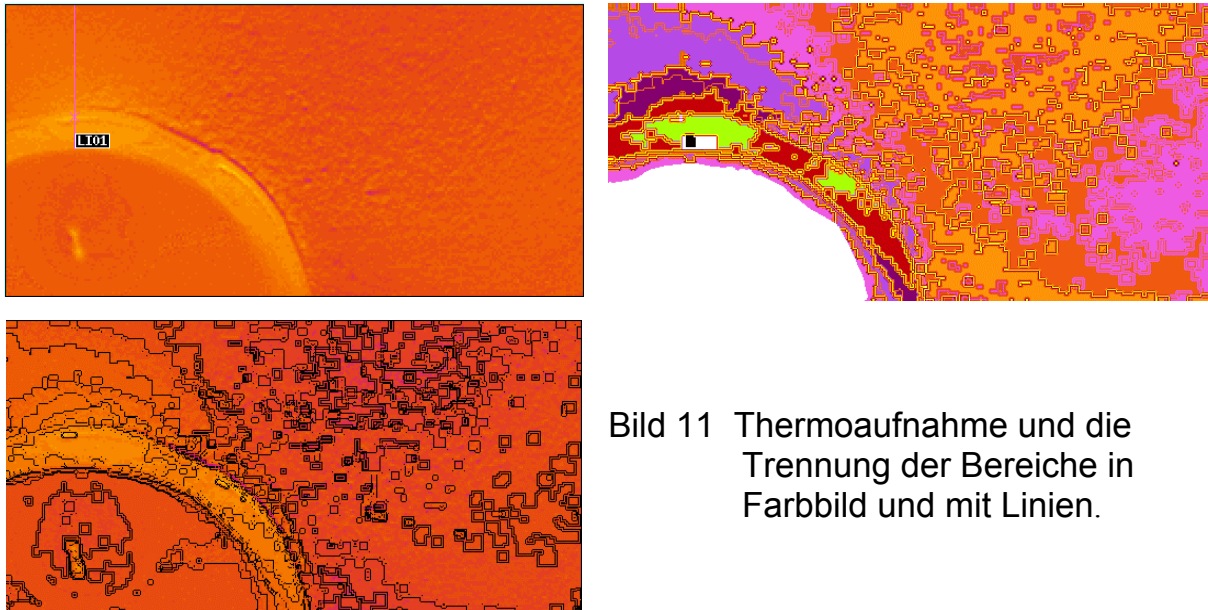


Bild 11 Thermoaufnahme und die Trennung der Bereiche in Farbbild und mit Linien.

3.3 Umrechnung der Temperaturdifferenzen in Spannungen

Die Umwandlung der Temperaturänderungen in Spannungen erfolgt:

Gl.(1.11) lässt sich für $\Delta\sigma$ formulieren:

$$\Delta\sigma = -\frac{\Delta T}{T \cdot K_m} \quad (3.1)$$

Für Stahl ist die thermoelastische Materialkonstante (z.B. [3],[6]):

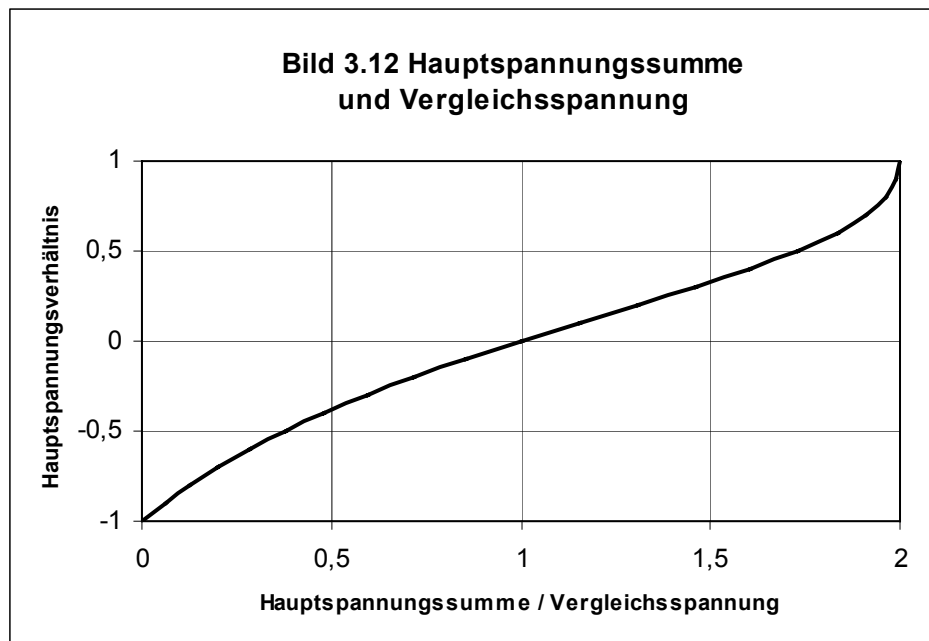
$$K_m = 3.32 \cdot 10^{-6} (N/mm^2)^{-1}$$

damit ergibt sich unter normaler Raumtemperatur (bei 20°C):

$$\begin{array}{ll} \Delta T = 0,1 \text{ K} & \text{Temperaturänderung verursacht} \\ \Delta\sigma = -102 \text{ N/mm}^2 & \text{Änderung in der Hauptspannungssumme.} \end{array}$$

Die Hauptspannungssumme ist nicht so einfach nutzbar wie die von Mises'sche Vergleichspannung. Das Bild 3.12 zeigt für den ebenen Spannungszustand eine Gegenüberstellung der Summe der Hauptspannungen und der Vergleichspannung. Die horizontale Achse zeigt das Verhältnis zwischen der Hauptspannungssumme und Vergleichspannung

$(\Sigma\sigma/\sigma_v)$, und die vertikale Achse das Verhältnis zwischen den Hauptspannungen (σ_2/σ_1).



Die Hauptspannungssumme ist nur bei einachsigem Spannungszustand ($\sigma_2 = 0$) gleich der Vergleichsspannung. Wenn eine Hauptspannung Zug- und die andere Druckspannung ist, bleibt die Hauptspannungssumme unter der Vergleichsspannung. Wenn beide gleiche Vorzeichen haben, überschreitet die Hauptspannungssumme die Vergleichsspannung. Die Hauptspannungssumme verschwindet bei reiner Schubspannung ($\sigma_2 = -\sigma_1$). Sie ist zweimal so groß wie die Vergleichsspannung bei hydrostatischem Spannungszustand ($\sigma_2 = \sigma_1$). Diese Problematik erschwert die Beurteilung der Beanspruchungen im Stahlbauteil, und den Vergleich der Messergebnisse z.B. mit FEM-Berechnungen.

Eine weitere Grenze bildet für die thermoelastische Spannungsanalyse die Plastizierung. Wie früher erwähnt wurde, zeigen sich die plastische Verformungen mit einem Wärmesprung, so dass bei Zug- als auch bei Druckbeanspruchung eine Erwärmung stattfindet.

Die Gl. (3.1) wurde bei der Umrechnung der Temperaturdifferenzen in Spannungsänderungen uneingeschränkt genutzt, weil im allgemeinen der ebene Spannungszustand vorhanden war.

Das AGEMA-System benutzt eine Signalverarbeitung, wobei die Messergebnisse auf 0,1 K aufgerundet werden. Eine Spannungsänderung mit

$\Delta\sigma=51 \text{ N/mm}^2$ und eine andere mit $\Delta\sigma=152 \text{ N/mm}^2$ verursacht wegen der Aufrundung eine gleiche gemessene Temperaturänderung $\Delta T=-0,1\text{K}$. Ein Bereich mit gleicher Temperatur ergibt deshalb nach der Umrechnung der Temperaturfelder in Spannungsfelder eine Zone, wo die Spannungsänderungen ($\Delta\sigma$) zwischen einem Maximal- und Minimalwert liegen. Die Spannungsfeld-Bilder aus Thermovision zeigen diese Zonen, die Spannungsänderungen liegen zwischen den angezeigten Grenzwerten.

4 Experimentelle Untersuchungen

4.1 Probekörper

Zwei Serien von Probekörpern wurden experimentell untersucht.

Zur ersten Serie gehörten 3 Versuchskörper, die große Spannungskonzentrationen aufzeigen und deshalb besonders empfindlich für Risse sind. An diesen Versuchen sollte die Anwendbarkeit der Methode für verschiedene Messzwecke im Stahlbaubereich geklärt und detailliert untersucht werden. Die drei Versuchskörper - ein gelochter Zugstab, ein Walzträger mit ausgeklinktem Auflagerbereich und ein Blechträger mit sehr schlankem Steg - zeigt Bild 4.1/a-b-c.

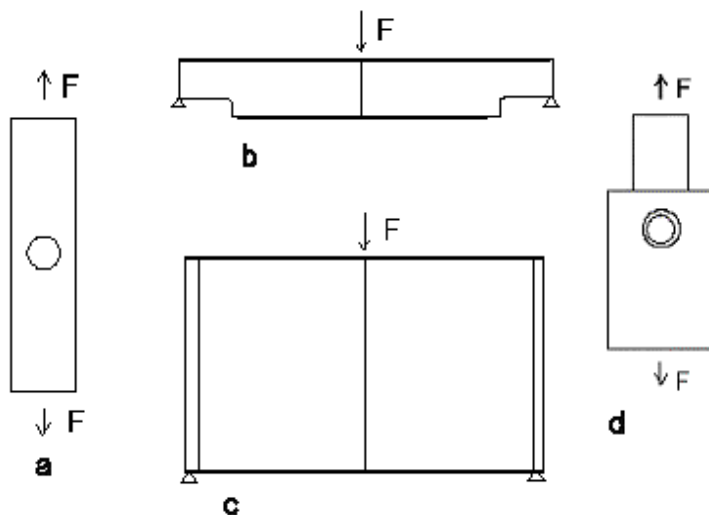


Bild 4.1 Versuchskörper

In der zweiten Versuchsserie wurde eine neue Verbindungstechnik für Stahlleichtbau untersucht und dadurch die Anwendbarkeit der Verfahren für einen komplizierten Stahlbauknoten geprüft. Die Rosetten-Verbindung war in der Entwicklungsphase, und wegen der komplizierten Geometrie benötigt die Analyse mit FEM-Methoden eine Kalibrierung. In einer Versuchsserie mit 3 Probestücken wurden die FEM-Ergebnisse experimentell kontrolliert. Bild 4.1/d zeigt die Probekörper.

4.2 Materialeigenschaften

Die Materialeigenschaften des Probekörpers wurden durch Zugproben bestimmt (Details siehe Anhang A3). Die Kennwerte sind in der Tabelle 4.1 zusammengefasst.

Tabelle 4.1

Versuchskörper	f_{yk} [MPa]	f_{uk} [MPa]	Elastizitätsmodul [MPa]
Zuglasche mit Loch	263	361	207 000
Ausgeklinkter Träger, Steg Flansch	317 300	435 430	202 000 196 000
Blechträger, Steg Flansch	267 287	374 422	190 000 197 000
Rosetten-Verbindung	410	470	206 000

4.3 Gelochter Zugstab

Das klassische Beispiel für Spannungskonzentrationen unter einfachen Bedingungen ist ein Zugblech, das in der Mitte ein Loch hat. Die Spannungsverteilung ist auch bekannt. Dieser Versuch dient zur Gegenüberstellung der Messergebnisse aus der Thermovision (TV) mit Ergebnissen konventioneller Dehnmess-Streifen (DMS) und mit Finiten-Elementen-Berechnungen (FEM).

Bild 4.2 enthält die Abmessungen des untersuchten Zugstabes (Länge 1050 mm) und die DMS-Anordnung neben dem Loch.

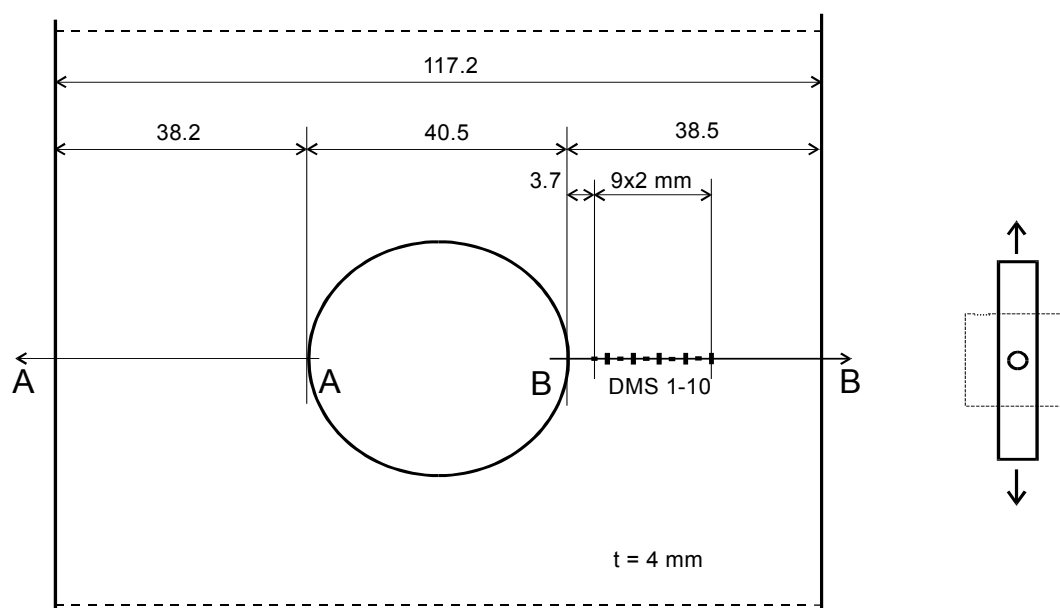


Bild 4.2 Gelochter Zugstab mit DMS-Anordnung

Tabelle 4.2

Laststufe	Zugkraft, Max. [kN]	Zugkraft, Min [kN]	Lastspielzahl
1	50.0	10.0	120
2	55.3	10.0	100
3	60.2	10.0	100
4	64.2	10.4	100
5	64.5	10.2	100
6	66.6	10.5	100
7	66.6	10.2	100
8	68.2	10.0	100
9	68.4	10.1	100
10	68.5	10.3	100
11	69.6	10.1	100
12	70.6	10.4	100
13	72.4	10.4	100
14	72.6	10.1	100
15	73.3	11.4	100
16	75.3	10.0	20
17	75.5	11.4	20
18	77.2	13.5	20
19	77.2	14.3	20
20	80.4	14.4	20
21	80.2	11.4	20
22	82.9	11.7	20
23	85.3	10.3	20
24	85.5	10.1	20
25	86.6	14.0	20
26	88.7	12.5	20
27	90.5	15.2	20
28	92.5	16.2	20
29	94.8	11.2	20
30	96.6	11.0	20
31	98.7	17.0	20
32	100.5	13.5	20
33	102.7	13.1	20
34	105.0	11.7	20
35	105.0	10.3	20
36	105.6	10.9	14
Zusammen:			1934

Die Belastung erfolgt mit stufenweise konstanten Lastamplituden, von 50% bis 70% der Traglast mit 100 Lastspielen pro Stufe, von 70% der Traglast bis zum Bruch mit 20 Lastspielen pro Stufe nach Tabelle 4.2.

Die im Versuch erzielte Bruchlast beträgt 105,6 kN, die FEM-Berechnung liefert (mit den gemessenen Materialkennwerten und bei monotoner Beanspruchung) 108 kN. Bei der FEM-Berechnung wurde ein linear elastisch-plastisches Materialgesetz angewandt, die Verfestigung bleibt unberücksichtigt.

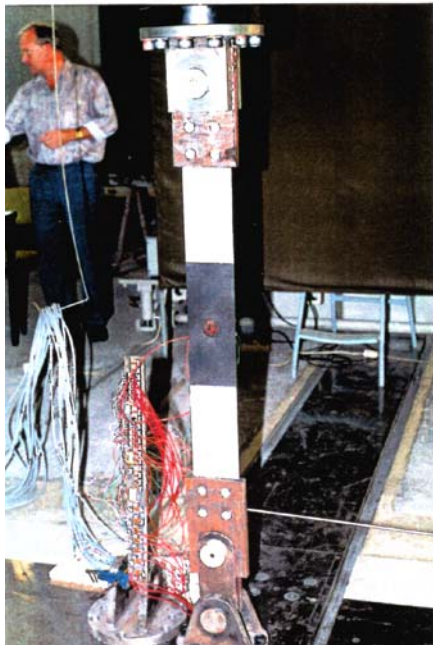


Bild 4.3
Versuchsanordnung

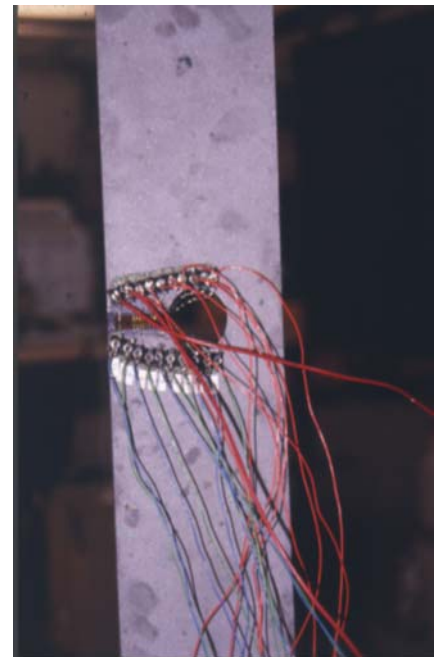
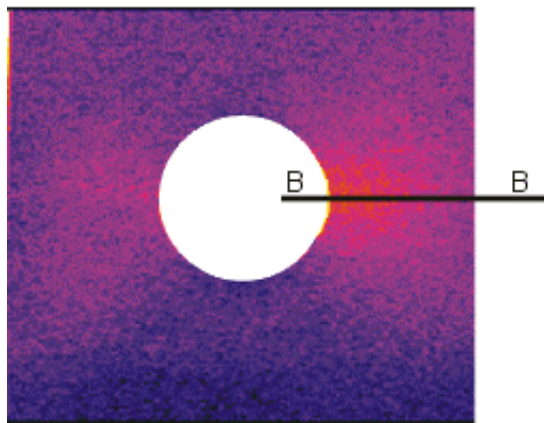


Bild 4.4
Aufgeklebte DMS

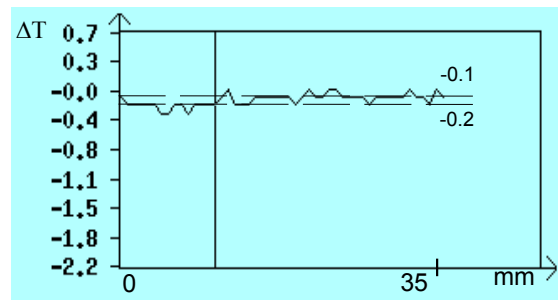
Bild 4.3 zeigt den Probekörper und Bild 4.4 die DMS-Anordnung in der Hinterseite.

In ausgewählten Laststufen ($F = 50; 55; 70; 80; 86; 95; 100$ kN) wurden die Infrarot-aufnahmen analysiert. Bild 4.5 zeigt vergleichend Temperaturänderungen ΔT und Spannungsdifferenzen $\Delta \sigma$ nach der thermoelastischen Analyse, DMS-Messungen und FEM-Berechnungen entlang der Messlinie B-B (siehe Bild 4.2) bei der Laststufe 50. Der Nullpunkt dieser Messlinie liegt am rechten Lochrand, auf der Abszisse im Bild ist die Entfernung von diesem Ursprung angegeben. Die Ergebnisse wurden in den Punkten der aufgeklebten DMS ausgewertet. Die DMS lieferten Dehnungen nur in eine Richtung, die zwischenwerte in Normalrichtung wurden interpoliert. Die Darstellung der Ergebnisse beginnt deshalb bei 5,7 mm (bei der 2. DMS).

Die Bilder 4.6/a – 4.6/f zeigen die Ergebnisse von o.g. Laststufen.



Thermoaufnahme



Temperaturänderungen entlang der Messlinie B-B

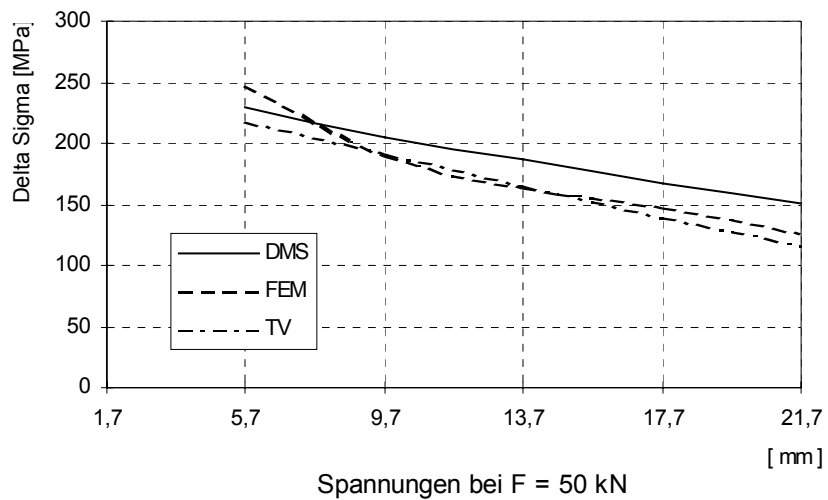
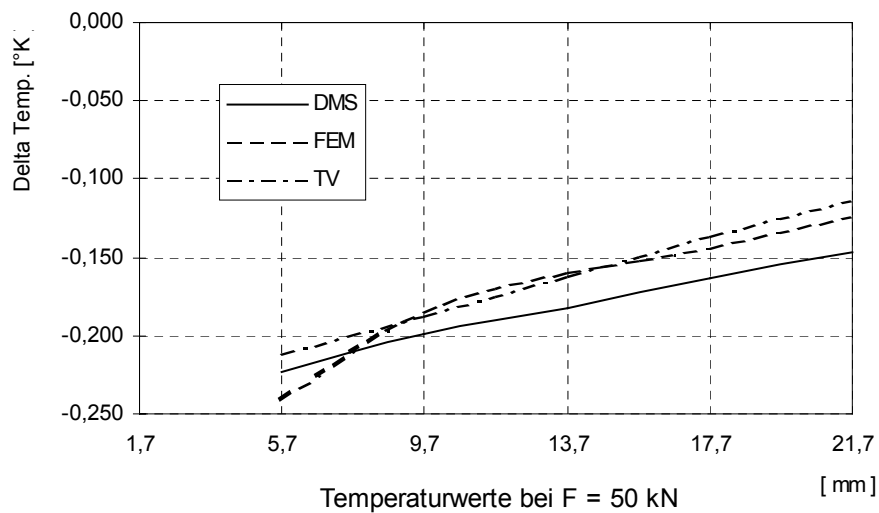
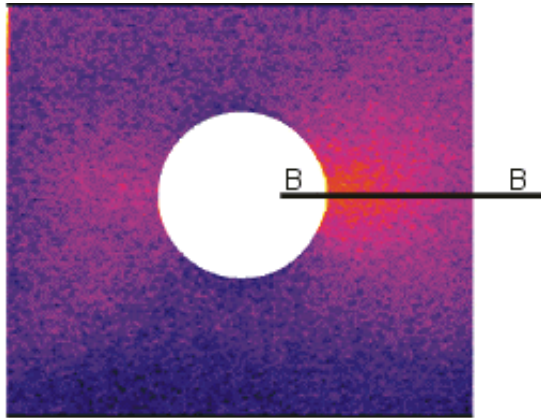
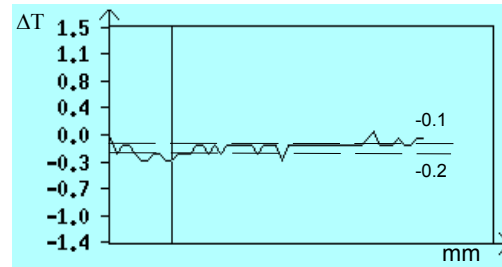


Bild 4.5 Ergebnisse bei F = 50 kN



Thermoaufnahme



Temperaturänderungen entlang der Messlinie B-B

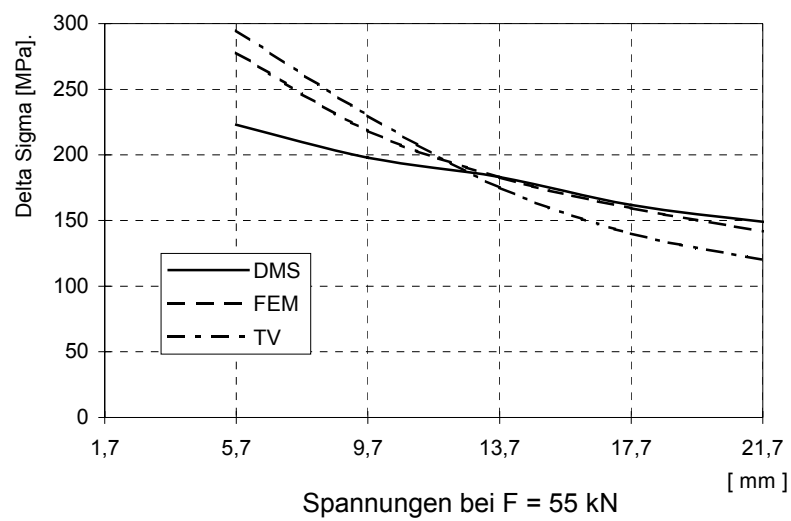
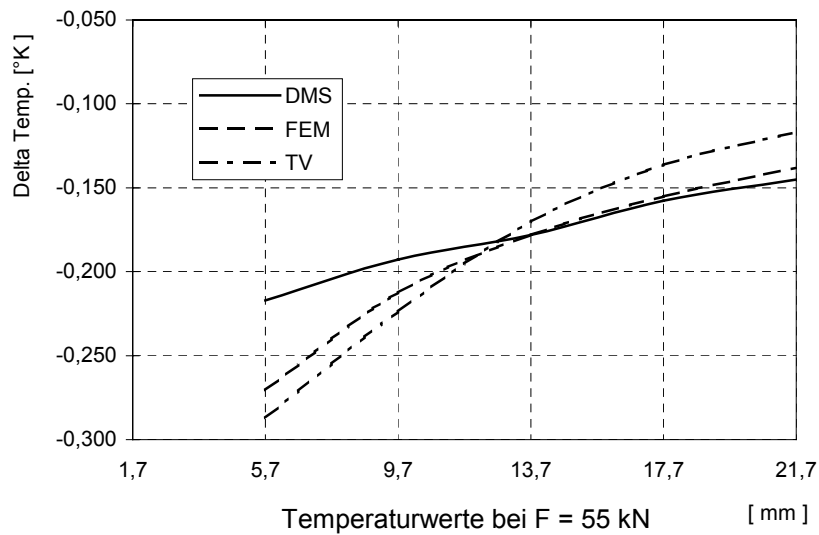
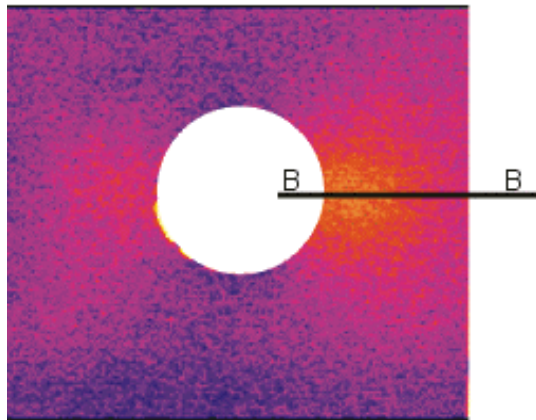
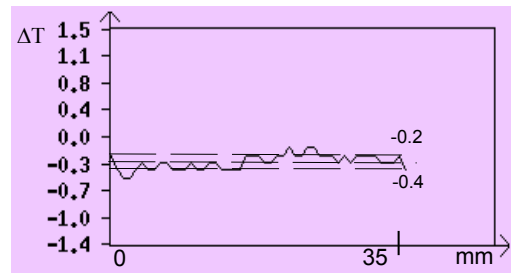


Bild 4.6/a Ergebnisse bei F = 55 kN



Thermoaufnahme



Temperaturänderungen entlang der Messlinie B-B

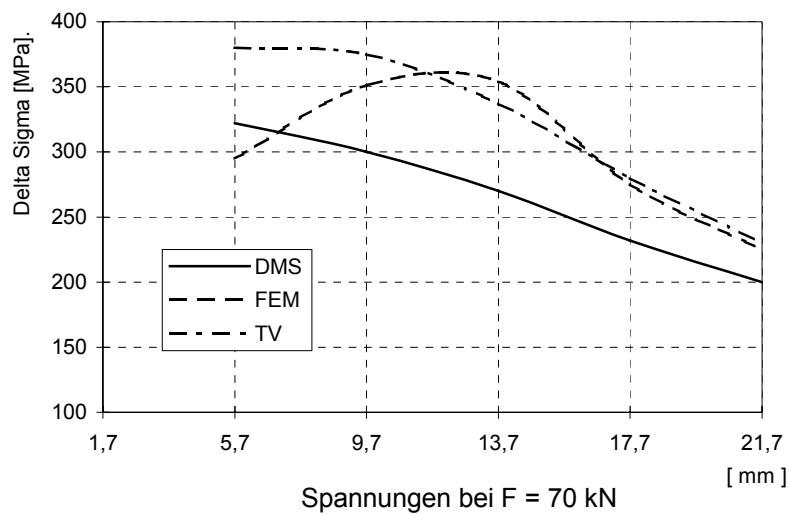
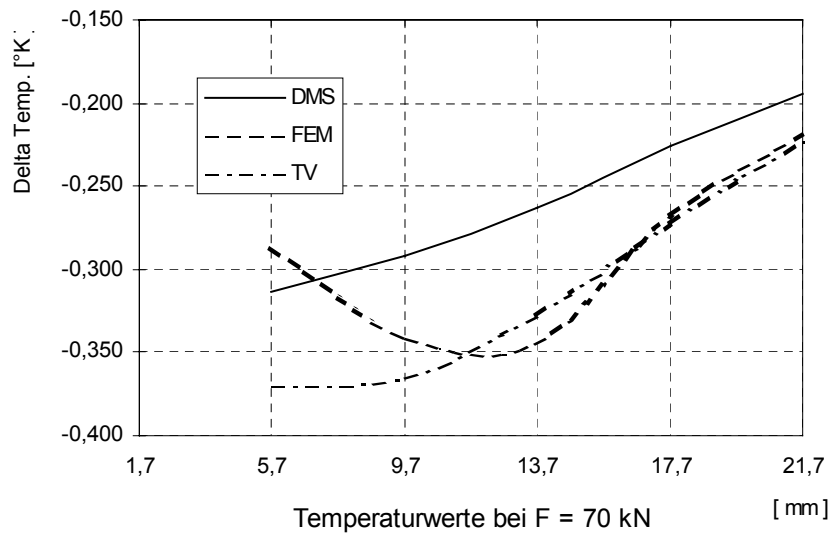
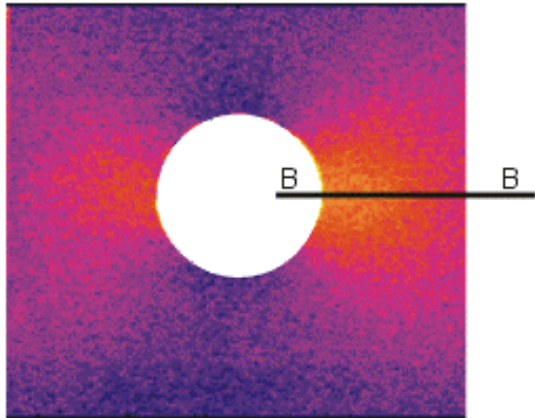
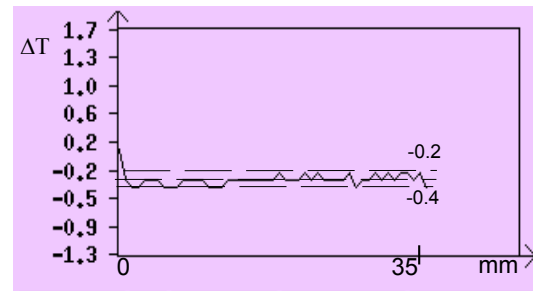


Bild 4.6/b Ergebnisse bei F = 70 kN



Thermoaufnahme



Temperaturänderungen entlang der Messlinie B-B

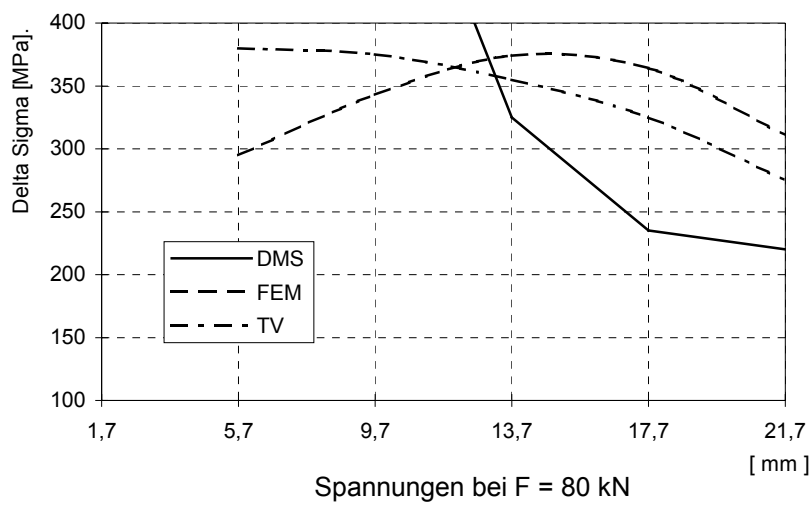
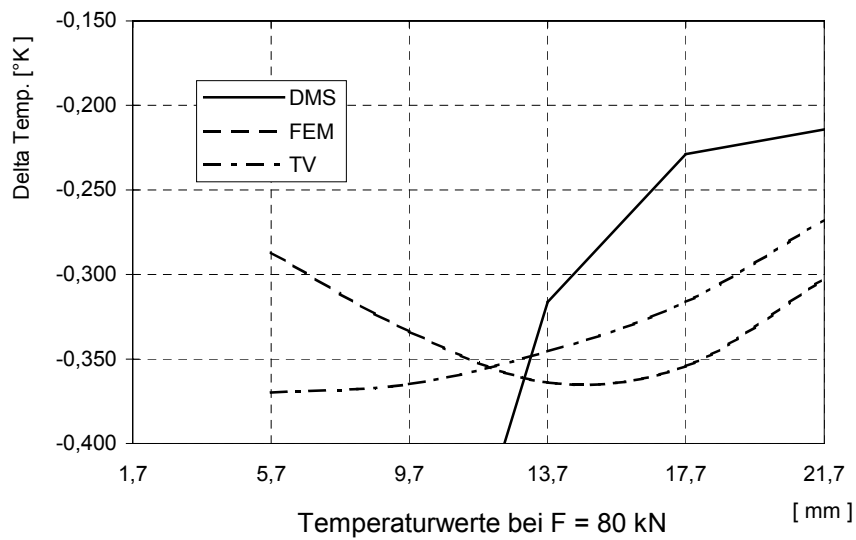
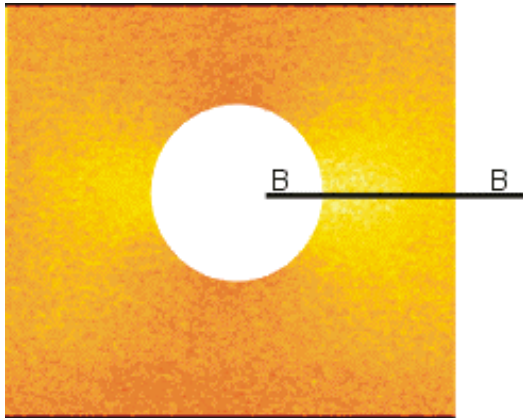
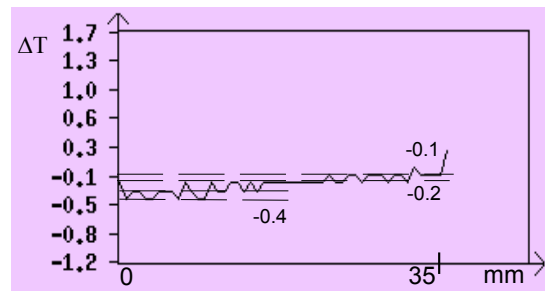


Bild 4.6/c Ergebnisse bei F = 80 kN



Thermoaufnahme



Temperaturänderungen entlang der Messlinie B-B

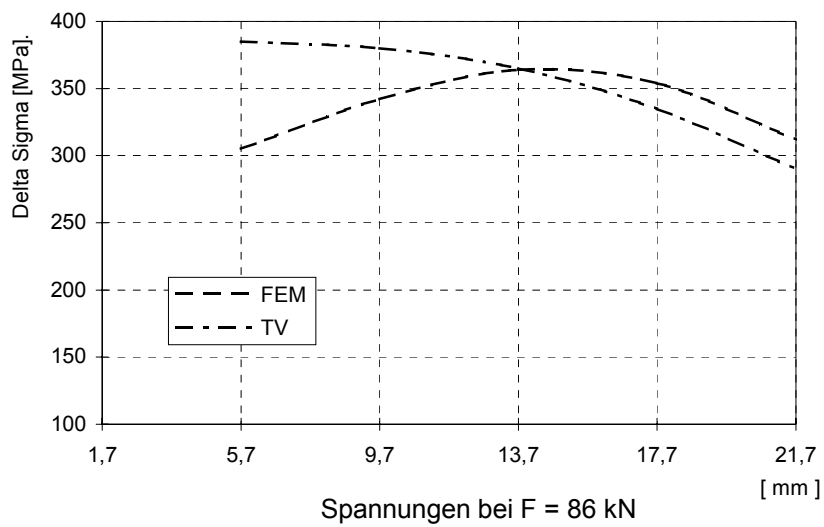
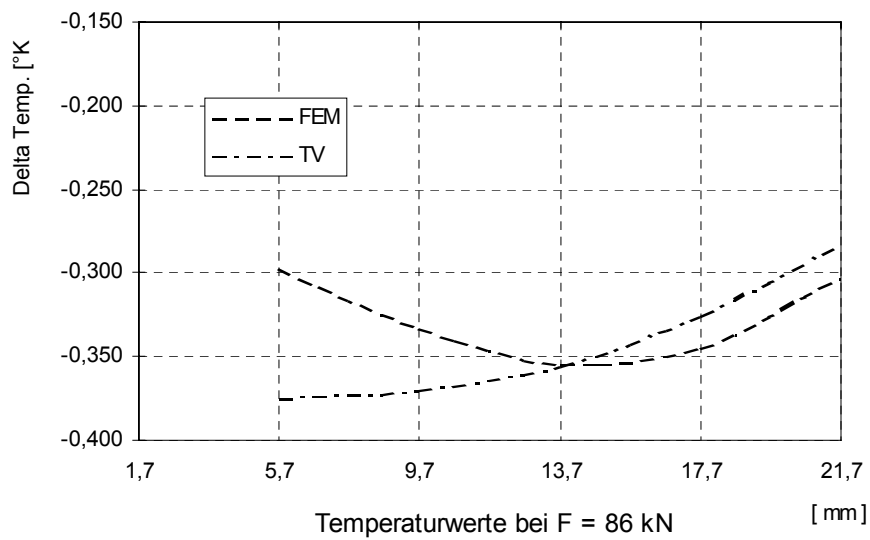
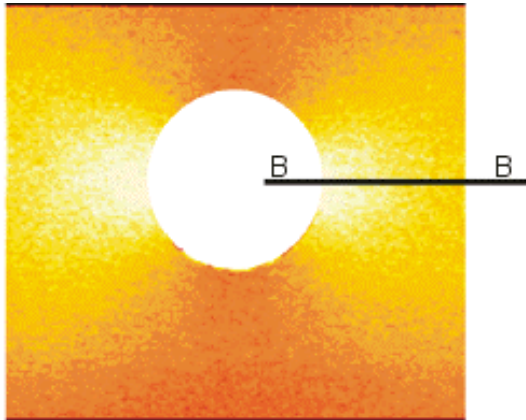
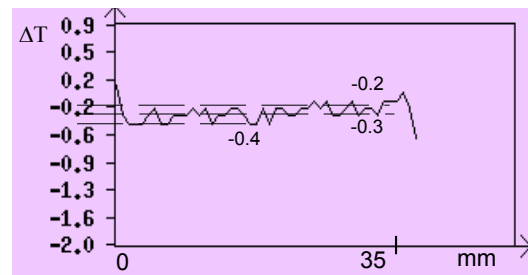


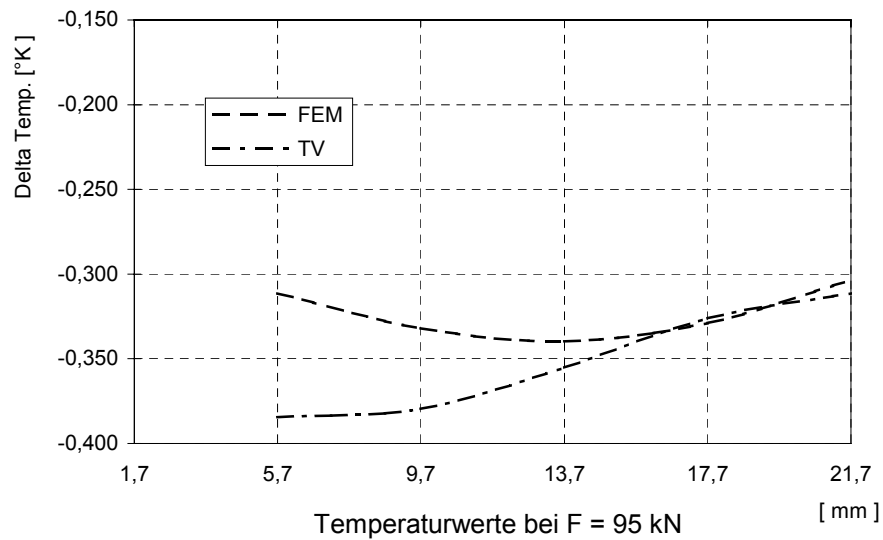
Bild 4.6/d Ergebnisse bei F = 86 kN



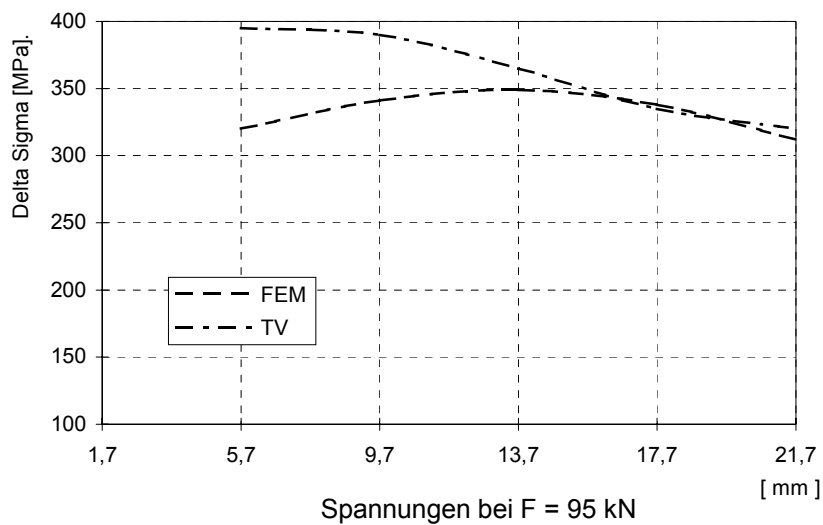
Thermoaufnahme



Temperaturänderungen entlang der Messlinie B-B

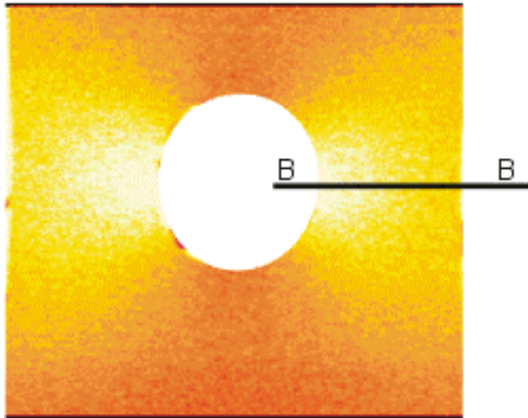


Temperaturwerte bei F = 95 kN



Spannungen bei F = 95 kN

Bild 4.6/e Ergebnisse bei F = 95 kN



Thermoaufnahme

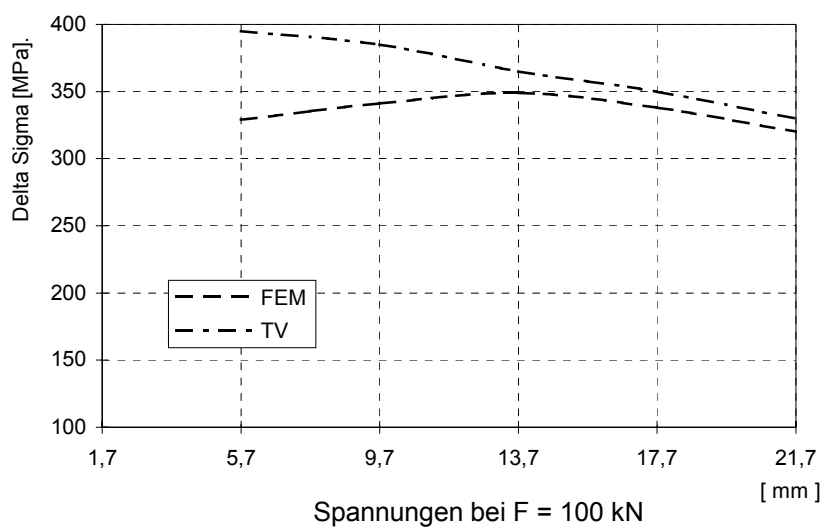
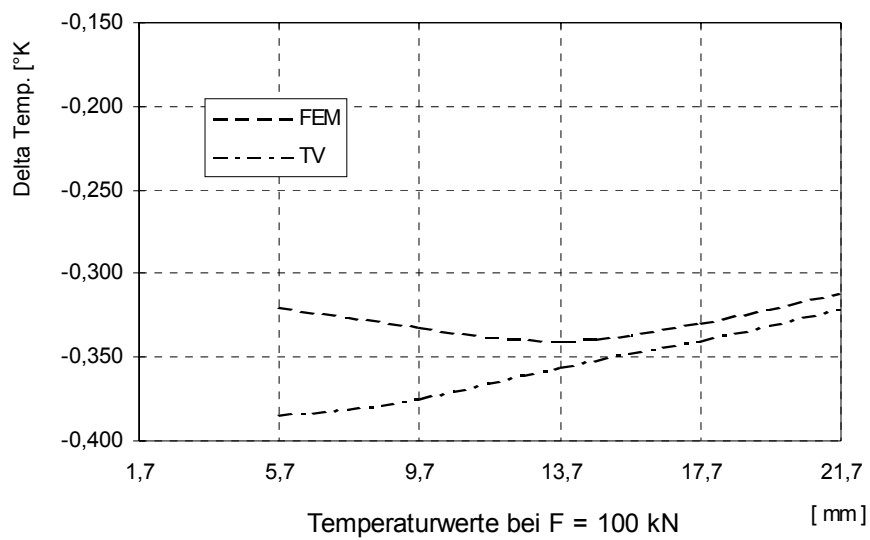


Bild 4.6/f Ergebnisse bei F = 100 kN

Die mit Thermovision gemessene Temperaturänderungen betragen $-0,1$ bis maximal $-0,4$ K. Die Temperaturänderungen wurden in den DMS-Aufklebepunkten aus dem Linienmessungsdiagramm abgelesen. Auf diese Messwerte wurde eine Kurve mittels Interpolationsfunktion geführt, damit ergibt sich die Temperaturänderungskurve und nach Gl.(3.1) umgerechnet die Spannungskurve aus der Thermovision. Die DMS und FEM lieferten zuerst die Spannungen, und dann wurden in Temperaturänderungen umgerechnet.

Der Unterschied zwischen den Spannungsdifferenzen nach den drei Verfahren bei geringer Last (50-55 kN) liegt innerhalb von 20%. Bei Laststeigerung vergrößert sich die Differenz, beginnend vom Lochrand. Einige DMS fallen bei 80 kN, alle fallen bei 86 kN aus, aber das Thermovisionsverfahren liefert vernünftige Ergebnisse bis zum Bruch!

Die Thermobilder und Spannungsfelder aus FEM-Berechnungen sind im Anhang zusammengefasst. Auflösung und den Rauschen in den Thermobildern erlaubt die automatische Auswertung der Differenzbilder nicht, deshalb könnte die Trennung der einzelnen Temperaturbereiche nur rein grafisch gemacht werden. Die Linienmessungen lieferten aber hinreichend genaue Ergebnisse

4.4 Ausgeklinkter Träger

Als Versuchsstück wurde ein handelsübliches Walzprofil IP200 gewählt, das mittig belastet wurde. Die Trägerenden haben eine im Stahlbau häufig angewandten Konstruktion, nämlich Kopfplatte mit Trägersausklinkung. Frühere Forschungen [1] haben gezeigt, dass unter zyklischer Beanspruchung solche ausgeklinkten Walzträger schon bei sehr wenigen Lastspielen Risse erfahren können.

Das Bild 4.7 enthält die Abmessungen des Probekörpers. Die Ausrundung des Eckbereichs der Ausklinkung beträgt $R=10\text{ mm}$. Die DMS wurden an beiden Auflagerbereichen entlang einer Linie mit einer Neigung von 45° ausgehend von der Eckausrundung aufgeklebt. Den Versuchsaufbau zeigt Bild 4.8.

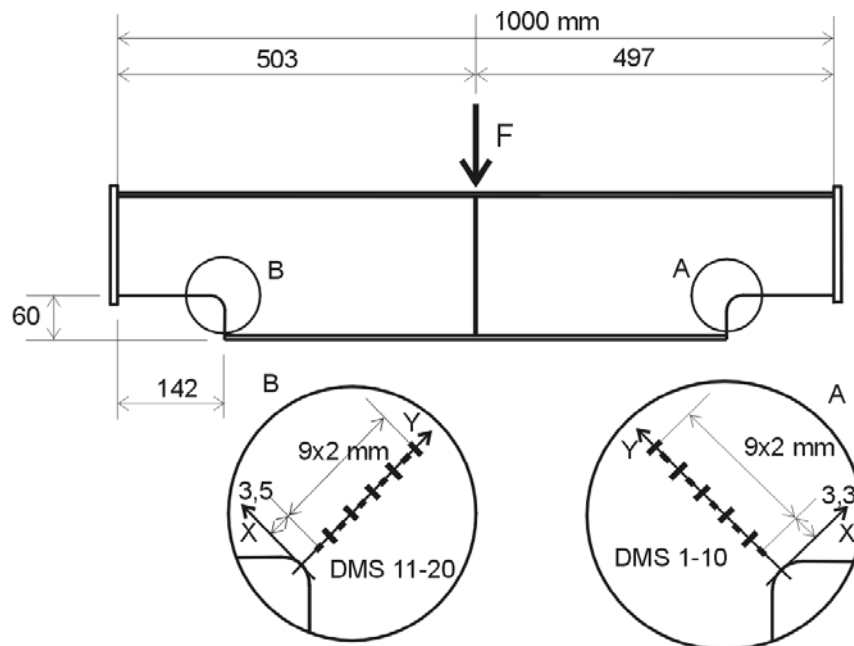


Bild 4.7 Ausgeklinkter Walzträger

Der rechte Auflagerbereich wurde mit der Thermovisionskamera beobachtet. Ziel war neben der Gegenüberstellung der Linienmessungen entlang der Messlinie „A“ auch der Vergleich zwischen den Spannungsfeldern aus thermoelastischen Ergebnissen und FEM-Berechnungen.

Die Belastung erfolgt beginnend bei 73 kN mit stufenweise konstanten Lastamplituden nach der Tabelle 4.3.

Tabelle 4.3 /a

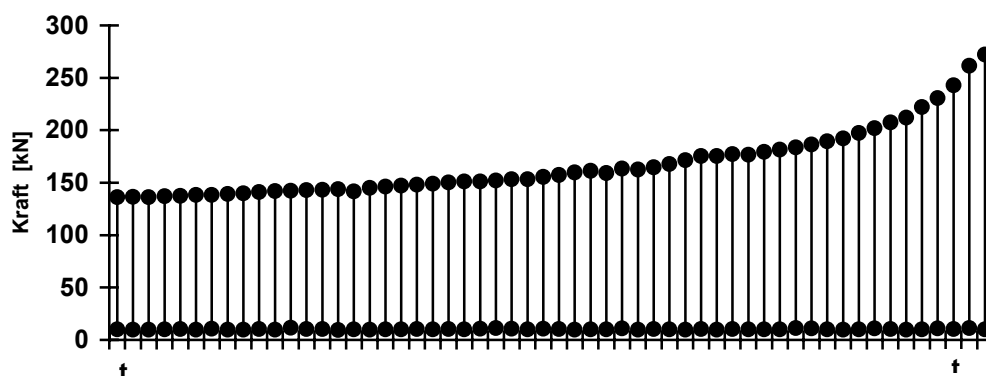
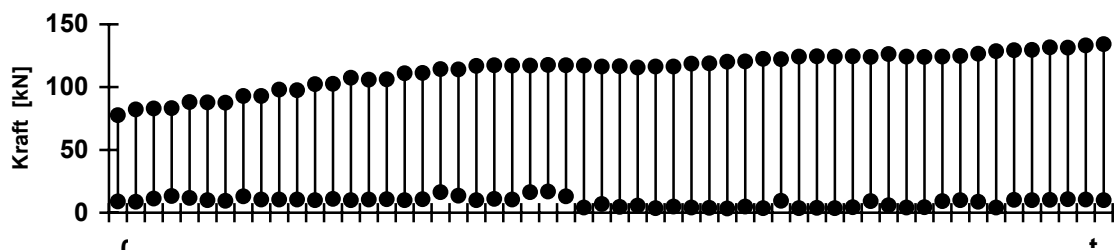
Laststufe	Druckkraft, Max. [kN]	Druckkraft, Min [kN]	Lastspielzahl
1	72.6	13.2	20
2	74.7	8.9	20
3	82.4	8.6	20
4	83.0	11.2	20
5	83.2	13.3	20
6	88.2	11.8	20
7	87.9	9.9	20
8	87.6	9.5	20
9	92.9	13.1	20
10	95.0	10.5	100
11	98.0	10.3	20
12	97.6	10.3	20
13	102.4	10.1	20
14	102.7	11.0	20
15	107.6	9.9	20
16	105.9	10.4	20
17	106.2	10.8	100
18	111.1	10.0	20
19	111.2	10.8	20
20	114.4	16.2	20
21	114.9	13.4	20
22	116.9	9.9	20
23	117.3	11.0	20
24	117.2	10.5	100
25	117.2	16.2	100
26	117.7	16.7	100
27	117.5	13.0	69
28	117.2	4.0	100
29	116.3	6.9	100
30	116.7	4.6	100
31	115.6	5.5	100
32	116.3	3.6	100
33	116.4	4.9	100
34	118.7	4.0	100
35	118.8	3.8	100
36	120.3	3.4	120
37	120.4	4.7	120
38	122.4	3.5	100
39	122.2	9.5	100
40	124.2	3.6	20
41	124.4	3.8	20
42	124.3	3.6	20
43	124.6	4.3	20
44	124.1	9.2	20
45	126.2	5.9	100
Zusammen:			2429

Tabelle 4.3 /b

Laststufe	Druckkraft, Max. [kN]	Druckkraft, Min [kN]	Lastspielzahl
Bisher:			2429
46	124.3	4.2	100
47	124.0	4.2	100
48	124.3	9.3	100
49	124.8	9.8	100
50	126.6	8.7	100
51	128.5	4.1	100
52	129.4	10.1	20
53	129.6	9.9	100
54	131.6	10.3	120
55	131.3	10.6	100
56	133.3	10.5	120
57	134.2	9.9	20
58	135.2	10.3	20
59	136.2	10.1	20
60	136.6	9.9	20
61	136.2	9.9	20
62	137.2	10.1	20
63	137.6	10.4	20
64	138.3	9.9	20
65	138.3	10.6	20
66	139.3	9.8	20
67	139.9	9.9	20
68	141.2	10.5	20
69	142.2	9.9	20
70	142.4	11.5	20
71	143.1	10.3	20
72	143.3	10.4	20
73	144.0	9.6	40
74	141.7	10.2	20
75	145.2	9.9	20
76	146.4	10.1	60
77	147.3	10.1	40
78	148.4	10.4	20
79	149.1	10.1	20
80	150.3	10.4	20
81	151.3	9.9	20
82	151.2	10.7	20
83	152.2	11.3	20
84	153.3	10.8	20
85	153.5	10.2	79
86	155.6	10.8	100
87	157.2	10.5	100
88	159.7	9.9	20
89	161.4	9.9	20
90	159.3	9.9	80
Zusammen:			4528

Tabelle 4.3 /c

Laststufe	Druckkraft, Max. [kN]	Druckkraft, Min [kN]	Lastspielzahl
Bisher:			4528
91	163.5	11.0	20
92	162.6	9.9	80
93	164.8	10.3	100
94	167.6	10.2	100
95	171.4	9.8	20
96	175.4	10.3	20
97	175.3	9.7	20
98	177.3	10.5	20
99	176.6	10.0	20
100	179.4	10.2	20
101	181.4	10.1	20
102	183.6	11.4	20
103	186.4	10.9	20
104	189.4	10.0	20
105	192.0	9.9	20
106	197.2	10.1	20
107	201.8	11.1	20
108	207.3	10.4	20
109	211.9	9.8	20
110	222.1	10.0	20
111	230.7	10.9	20
112	242.8	10.4	20
113	261.6	11.2	20
114	272.2	10.1	14
Zusammen:			5222



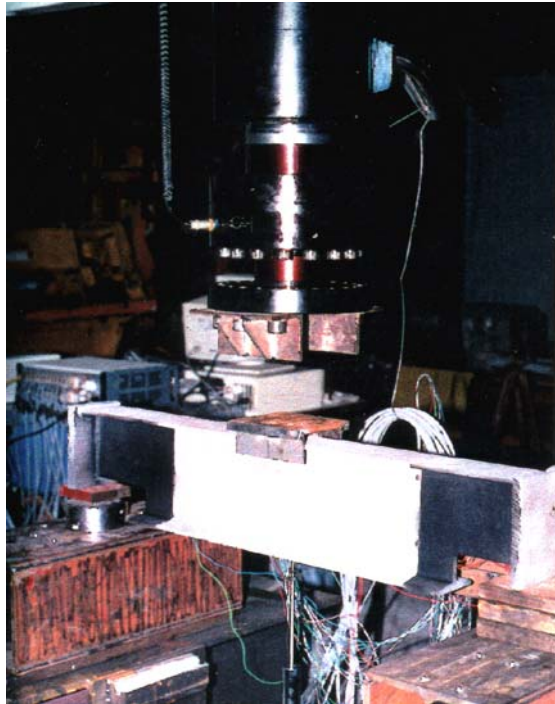


Bild 4.8 Ausgeklinkter Träger, am Auflagerbereichen mit schwarzer Beschichtung

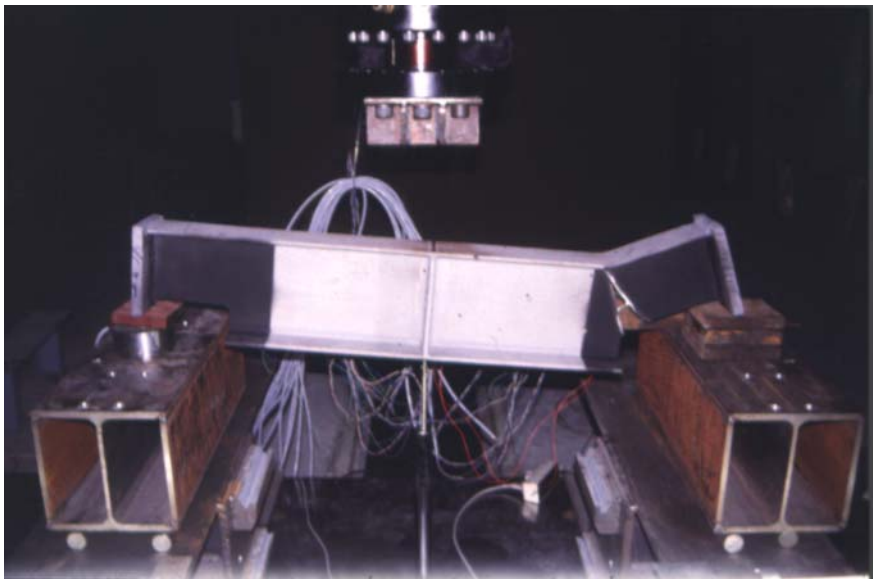


Bild 4.9. Versuchskörper im Versagenszustand

Die experimentelle Bruchlast beträgt 272,2 kN bei insgesamt 5222 Lastspielen. Die FEM-Berechnung ergibt als Bruchlast 281 kN. Der rechte Auflagerbereich versagt (Bild 4.9).

In ausgewählten Laststufen ($F = 75, 95, 115, 135, 155, 175 \text{ kN}$) wurden die Thermoauflagen analysiert. Der Vergleich der mit Thermovision gemessenen und mit FEM berechneten Spannungsfelder im rechten Auflagerbereich ist in den Bildern 4.10/a – 4.10/f gezeigt.

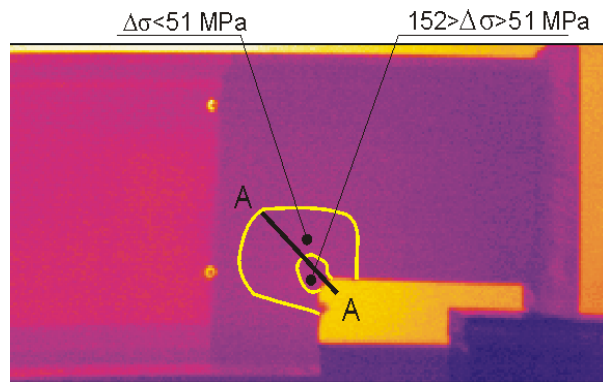
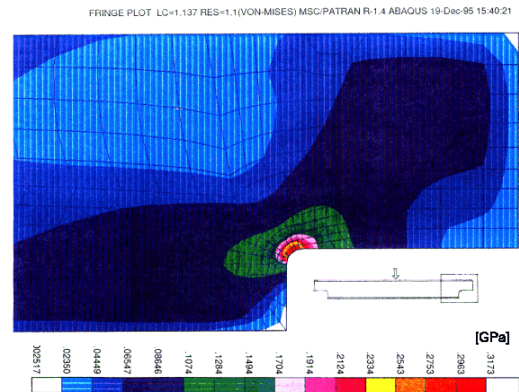


Bild 4.10/a Spannungsfeld aus Thermobild



und aus FEM, $F = 75 \text{ kN}$

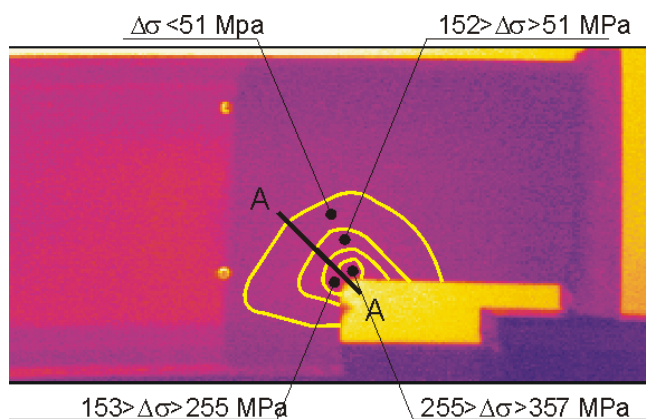
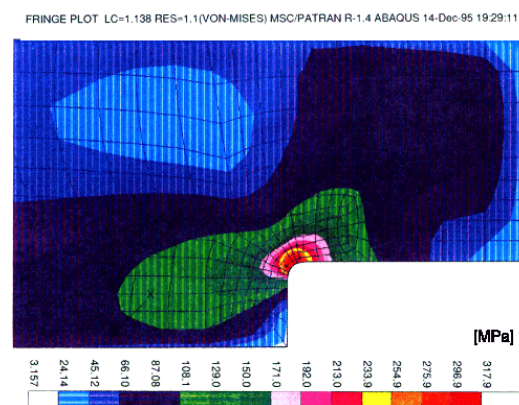


Bild 4.10/b Spannungsfeld aus Thermobild



und aus FEM, $F = 95 \text{ kN}$

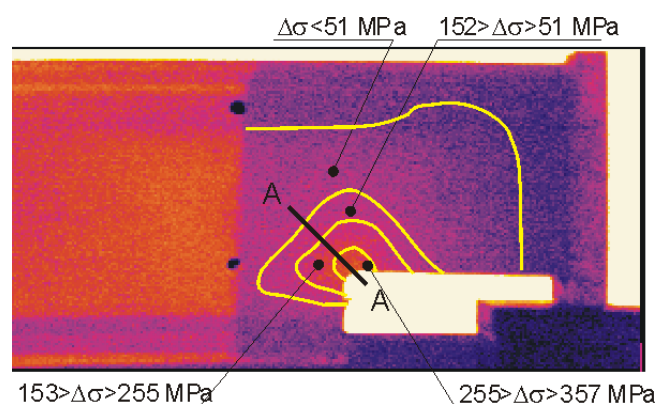
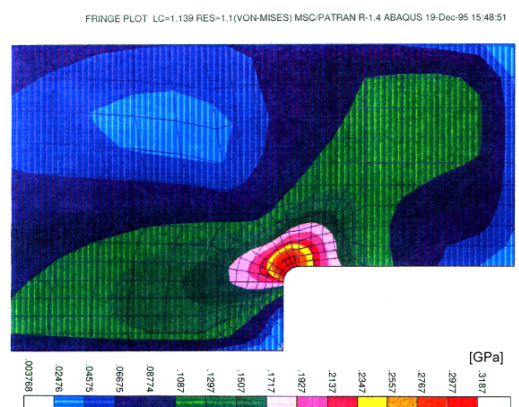


Bild 4.10/c Spannungsfeld aus Thermobild



und aus FEM, $F = 115 \text{ kN}$

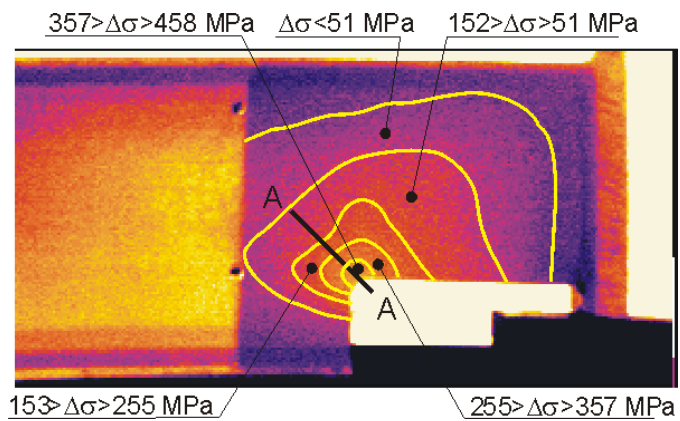
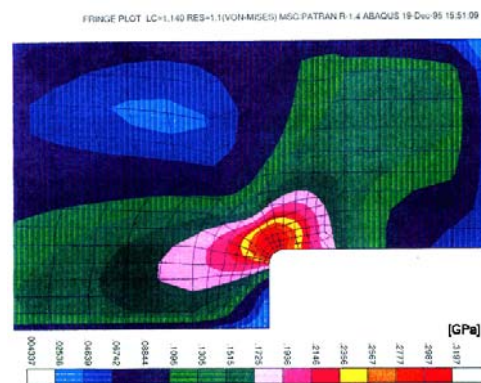


Bild 4.10/d Spannungsfeld aus Thermobild



und aus FEM, F = 135 kN

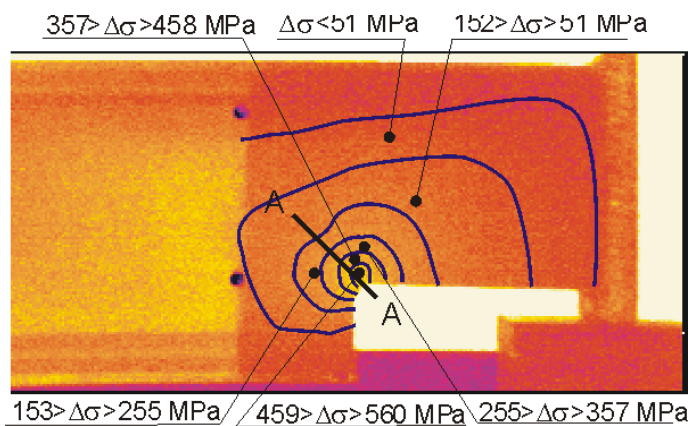
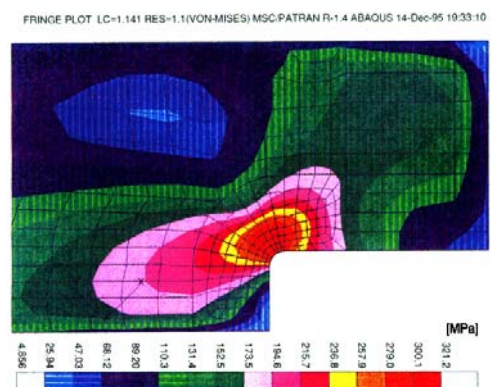


Bild 4.10/e Spannungsfeld aus Thermobild



und aus FEM, F = 155 kN

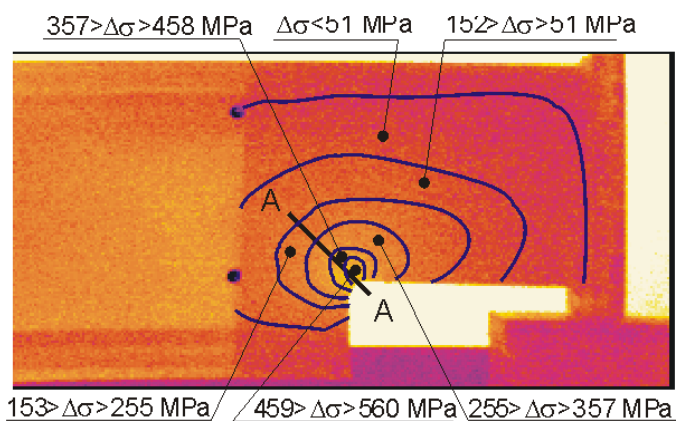
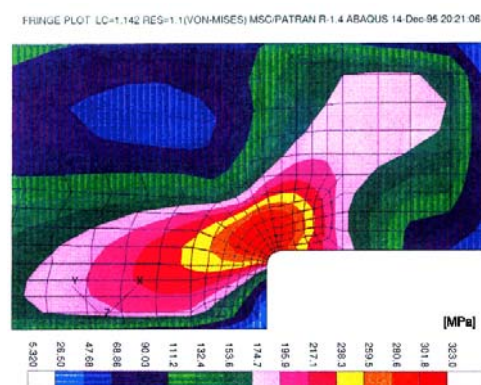


Bild 4.10/f Spannungsfeld aus Thermobild

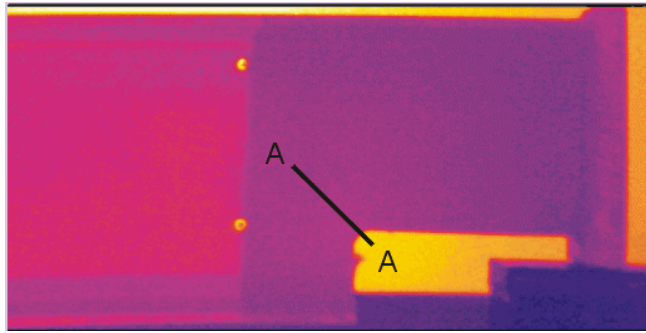


und aus FEM, F = 175 kN

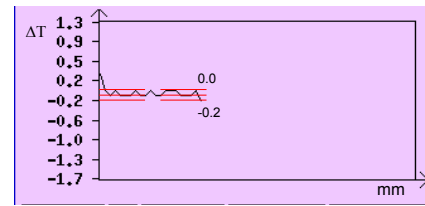
Die Mehrzahl der Dehnmess-Streifen fällt schon bei einer Belastung von $F = 135\text{--}170\text{ kN}$ aus

Die Auswertung der Linienmessungen erfolgten entlang der Messlinie „A“ nach dem bekannten Prinzip. Die Bilder 4.11/a – 4.11/d zeigen vergleichend die Spannungsdifferenzen und Temperaturdifferenzen bei der Laststufen von 75 kN bis 135 kN nach der thermoelastischen Analyse (TV), gemessen mit DMS und berechnet mit FEM. Der Nullpunkt dieser Messlinie liegt am Rand der Ausklinkung, auf der Abszisse der Diagramme ist die Entfernung von diesem Ursprung angegeben.

Die Spannungskonzentration an der Eckausrundung ist sehr hoch. Die Ergebnisse zeigen schon bei einer Belastung von 135 kN eine hohe Temperaturänderung ($-0,5\text{K}$) an der Eckausrundung, der spätere Anrisspunkt am Rande der Ausrundung kündigte sich schon früh an. In dem Bereich liegt ein ebener Spannungszustand vor, die Temperaturänderungen aus Thermovision zeigen diesen Einfluss auch. Die Übereinstimmung zwischen den Spannungen aus der thermoelastischen Spannungsanalyse, DMS und FEM ist bei kleineren Laststufen gut, aber besonders in der Nähe der Ausrundung und bei zunehmender Last wird die Differenz bemerkbar. Die Auswertung der Linienmessungen zeigen diesen Effekt auch. In diesem Bereich ist die einfache elastische Annäherung nicht mehr gültig, ein genauerer Nachweis ist nötig.



Thermoaufnahme



Temperaturänderungen entlang der Messlinie A-A

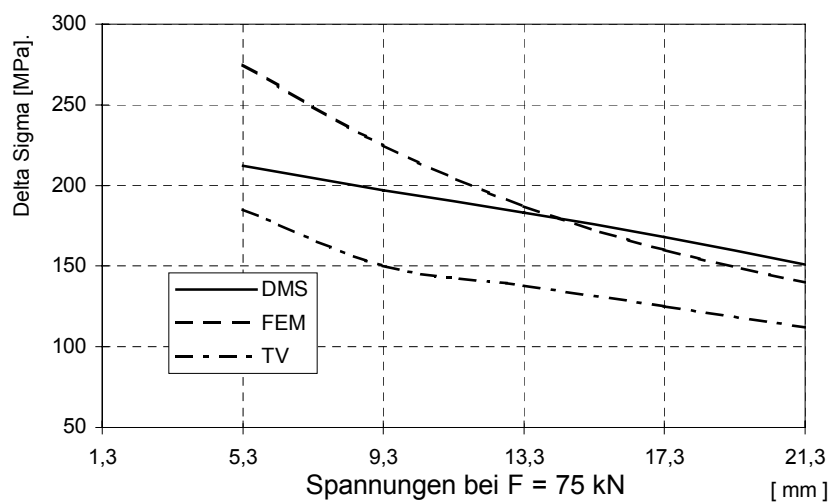
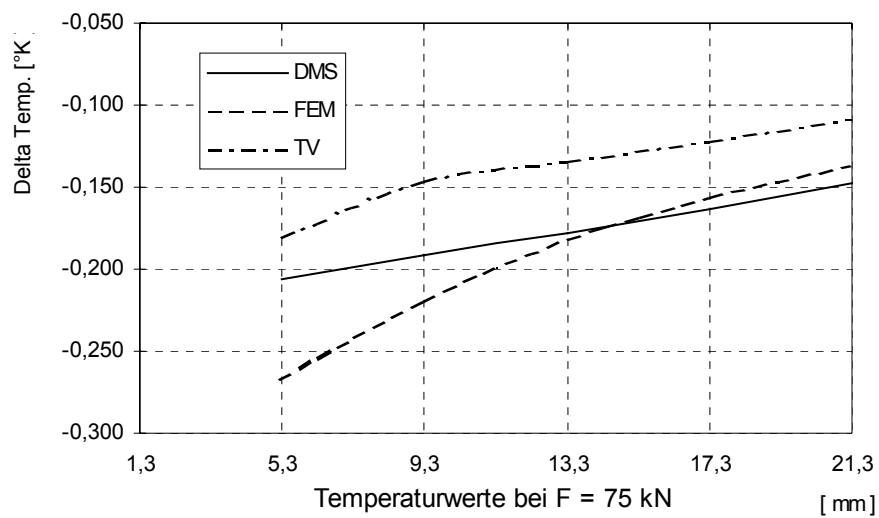
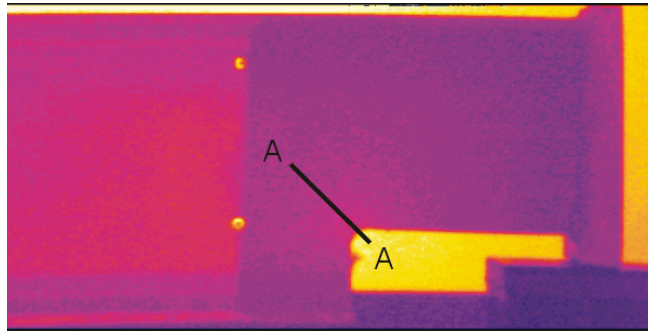
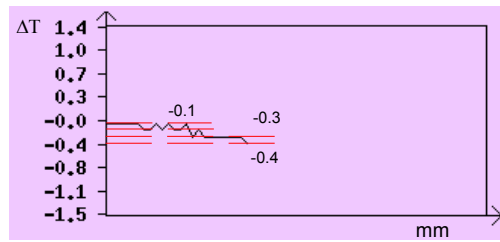


Bild 4.11/a Ergebnisse bei $F = 75 \text{ kN}$



Thermoaufnahme



Temperaturänderungen entlang der Messlinie A-A

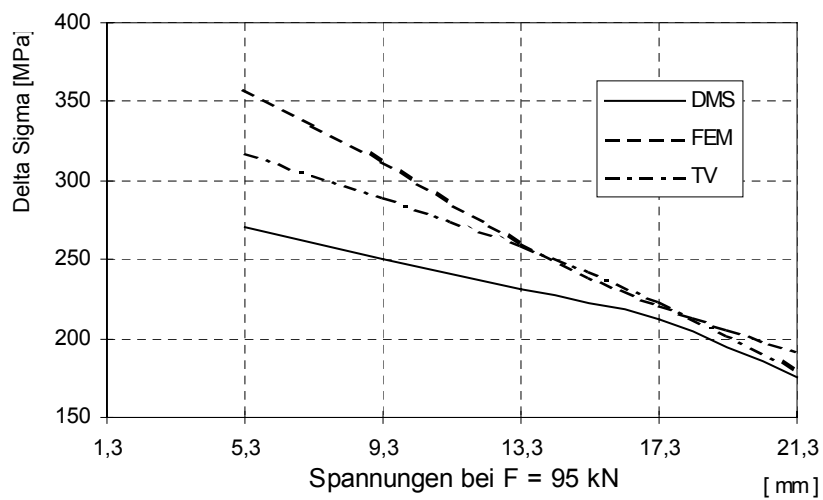
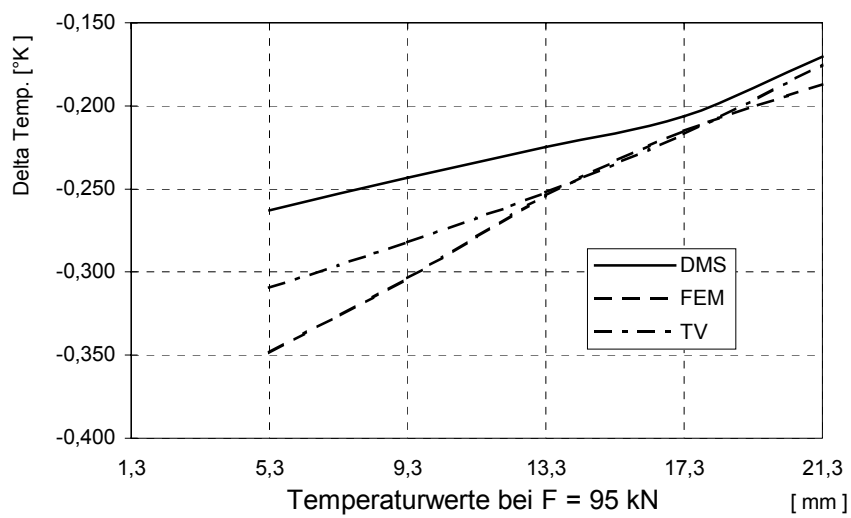
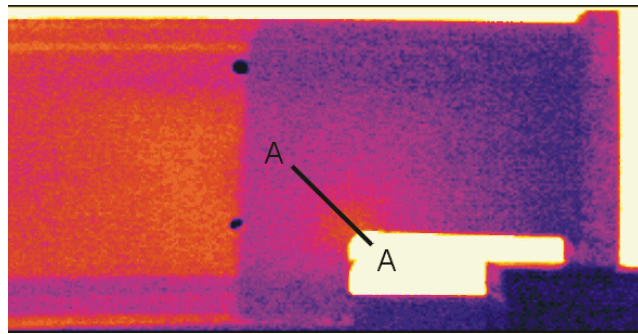
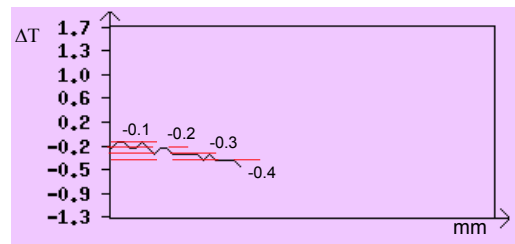


Bild 4.11/b Ergebnisse bei $F = 95 \text{ kN}$



Thermoaufnahme



Temperaturänderungen entlang der Messlinie A-A

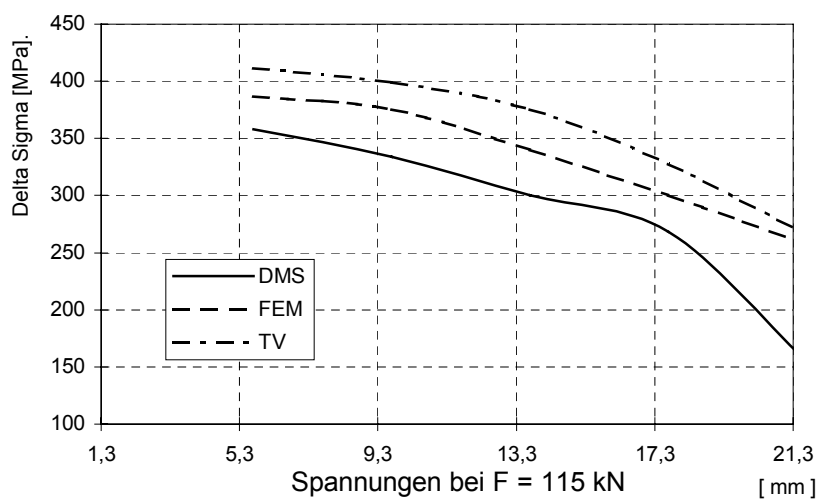
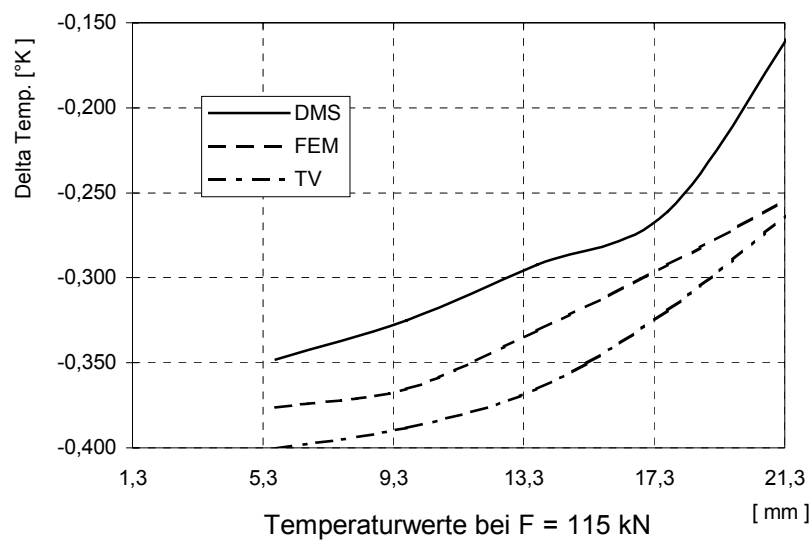


Bild 4.11/c Ergebnisse bei $F = 115 \text{ kN}$

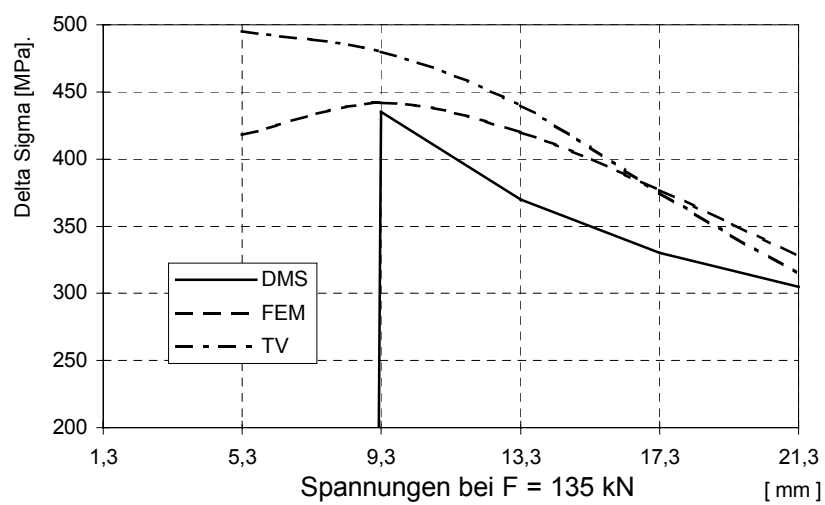
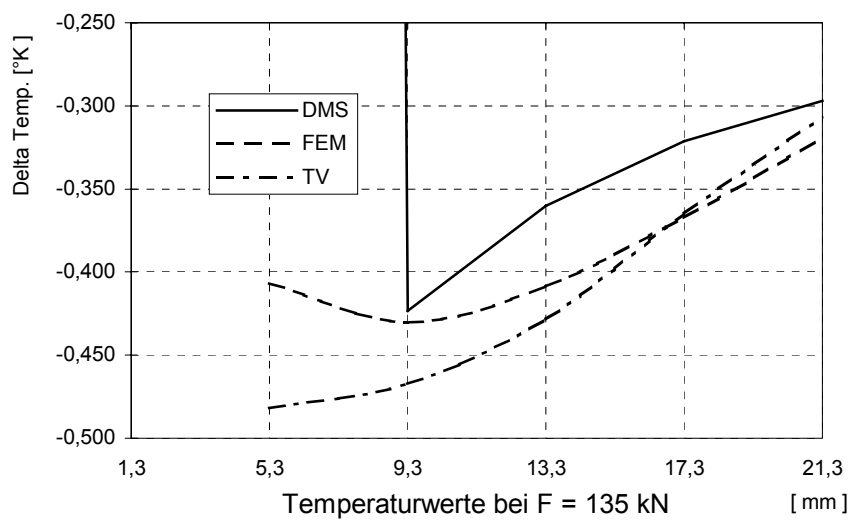
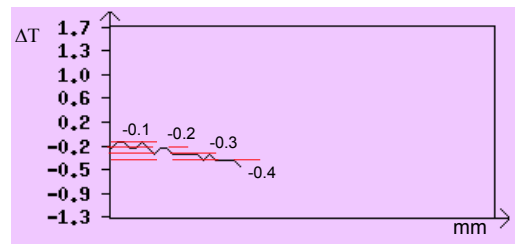
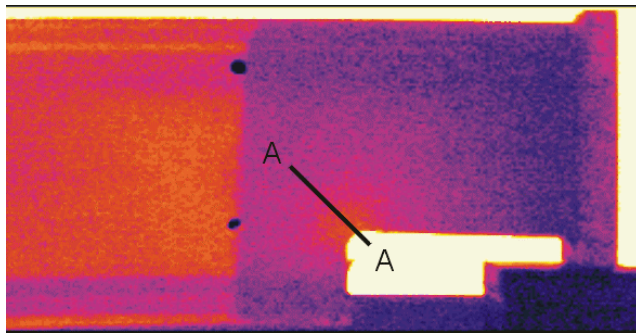


Bild 4.11/d Ergebnisse bei $F = 135 \text{ kN}$

4.5 Geschweißter Vollwandträger

Der Vollwandträger besteht aus einem sehr dünnen Stegblech mit einer Dicke von 1,5 mm sowie Gurten aus Flachstahl 80 x 10 mm. Bild 4.12 zeigt die Ansicht des Versuchsmodells.

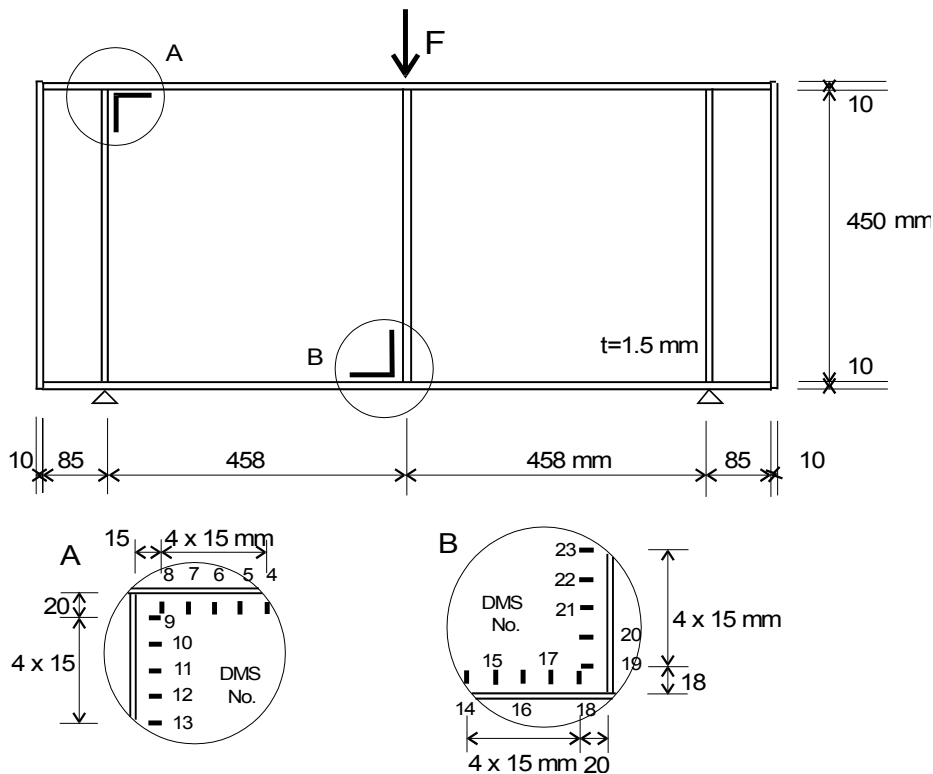


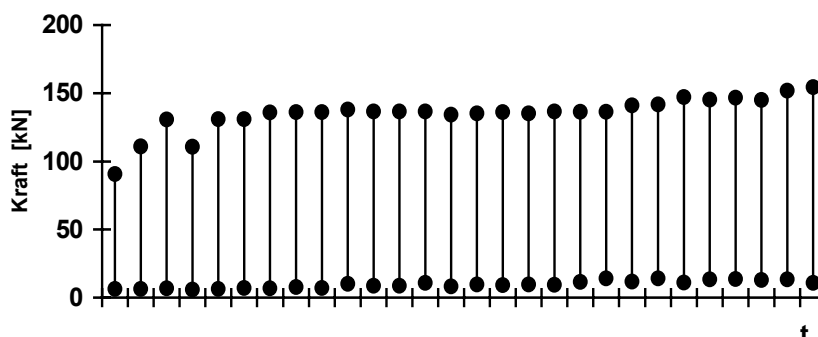
Bild 4.12 Vollwandträger mit DMS-Anordnung

Die Belastung erfolgt wieder stufenweise, von 60% bis 80% der Traglast in Stufen von 20 kN und 5 Lastspiele pro Stufe, dann bei 80% der Traglast insgesamt 720 Lastzyklen, dann in kleineren Stufen bis zum Versagen mit 50 Lastzyklen je Stufe (Tabelle 4.4).

Das Zugfeld im Steg entwickelte sich bereits weniger Laststufen. Die experimentelle Traglast beträgt 154,5 kN, nach der FEM-Berechnungen ist es 146 kN.

Tabelle 4.4

Laststufe	Druckkraft, Max. [kN]	Druckkraft, Min [kN]	Lastspielzahl
1	90.5	5.9	5
2	90.6	6.3	5
3	110.9	6.2	5
4	130.6	6.8	5
5	110.7	6.0	5
6	130.8	6.2	5
7	130.9	7.2	5
8	135.9	6.8	5
9	136.0	7.7	5
10	136.0	6.9	5
11	138.0	10.2	10
12	136.5	8.6	50
13	136.5	8.6	10
14	136.7	10.9	10
15	134.2	8.2	10
16	135.2	9.6	10
17	136.0	9.1	100
18	135.0	9.6	100
19	136.5	9.4	100
20	136.4	11.5	100
21	136.4	14.6	100
22	141.1	11.8	100
23	141.8	14.1	20
24	147.1	11.1	50
25	145.1	13.5	50
26	146.2	13.6	50
27	145.1	12.9	50
28	151.8	13.4	50
29	154.5	10.8	18
Zusammen:			1038



Für die Thermovisionskamera ist der Betrachtungswinkel zu groß, die Auflösung der Kamera ermöglicht bei dieser Bildgröße keine linienorientierte Auswertung mehr. Dennoch wird das Spannungsfeld qualitativ richtig erfasst, wie beispielweise der Vergleich auf Bild 4.13 mit FEM-Ergebnissen für die linke Trägerhälfte bestätigt.

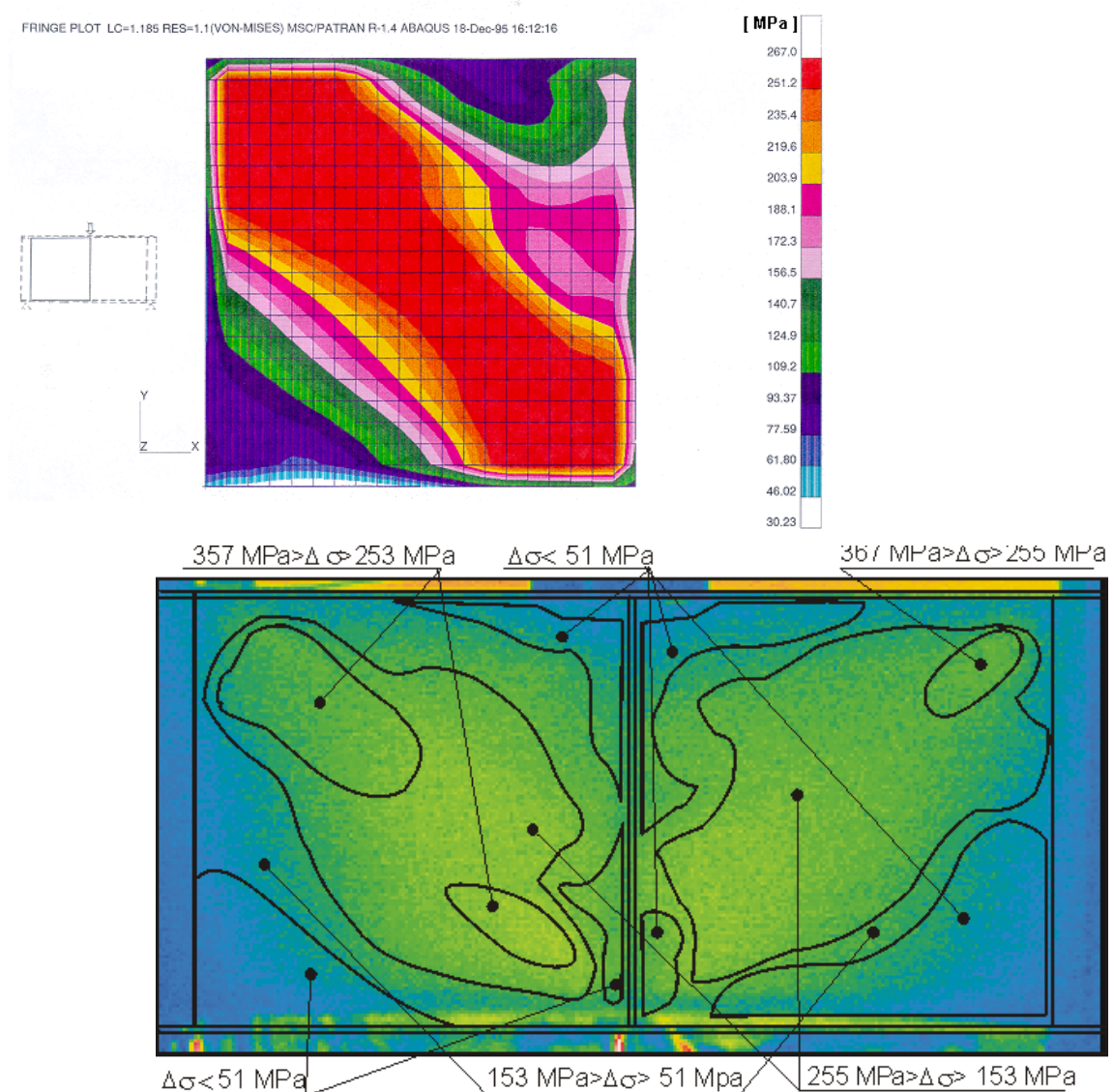


Bild 4.13 Spannungsfeld aus FEM-Berechnung (linke Trägerhälfte) und aus Thermovision

Kurz vor dem Erreichen der Traglast wachsen die Spannungen über die Fließgrenze hinaus, die thermoelastische Annäherung ist nicht mehr gültig. Mit dem Verfahren kann aber der Vorgang der Plastizierung im Träger und damit der Versagensmechanismus verfolgt werden (siehe Abschnitt 4.7).

Der Versagenszustand, nämlich Zugfeld, stark verformter Obergurt, Schweißnahttriss kann im Bild 4.14 betrachtet werden.

Bild 4.14
Vollwandträger



4.6 Untersuchungen von Rosetten-Verbindungen



Die Rosetten-Verbindung ist ein völlig neues Verfahren, das speziell für dünnwandige Stahlbauteile geeignet und mehrere Vorteile gegenüber den konventionellen Verbindungstechniken (Schrauben, Nieten) hat [30]. Die Rosetten-Verbindung besteht aus zwei vorgefertigten Teilen, jedes Teil hat ein Loch mit speziellem Randflansch. Die Rosette wird mit Hilfe eines speziellen Werkzeugs durch Zusammenpressen der Teile hergestellt. Bild 4.15 zeigt eine Verbindung.

Die Anwendung der Rosetten-Verbindung für Stahlkonstruktionen ist in der Entwicklungsphase. Für einen vereinfachten Bemessungsnachweis sind bessere Kenntnisse über das Tragverhalten nötig. Die Tragfähigkeit wurde bisher in Versuchsserien untersucht. Die FE-Modellierung war Gegenstand der damaligen Forschung. Bei solchen komplizierten geometrischen Verhältnissen ist es unbedingt erforderlich, die FEM-Berechnungen mit experimentellen Ergebnissen zu kontrollieren. Für diesen Zweck wurden diese Versuche durchgeführt.

Bild 4.15
Rosetten-Verbindung

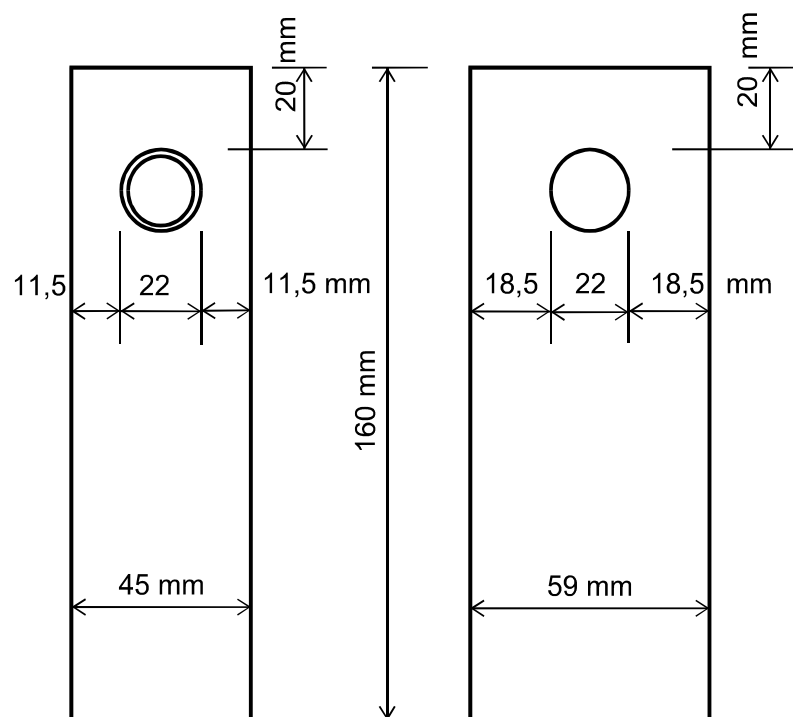


Bild 4.16
Die Abmessungen
eines Versuchskörpers

Als Versuchskörper wurden 3 Zugstäbe gewählt, die aus Flacheisen mit Rosettenverbindung erzeugt wurden. Die Probekörper zeigt Bild 4.16. Die Blechdicke beträgt 1.5 mm. Das Material ist S350GD+Z, ein speziell galvanisierter Stahl.

Der erste Versuch diente zur Kalibrierung des Messverfahrens, die im Versuch erzielte Bruchlast betrug 12.5 kN.

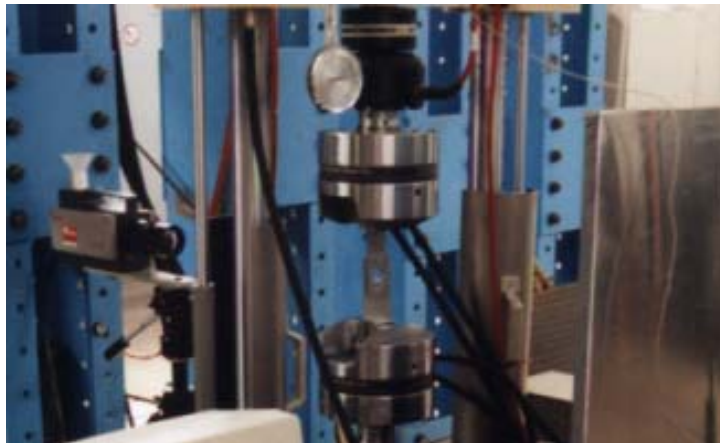


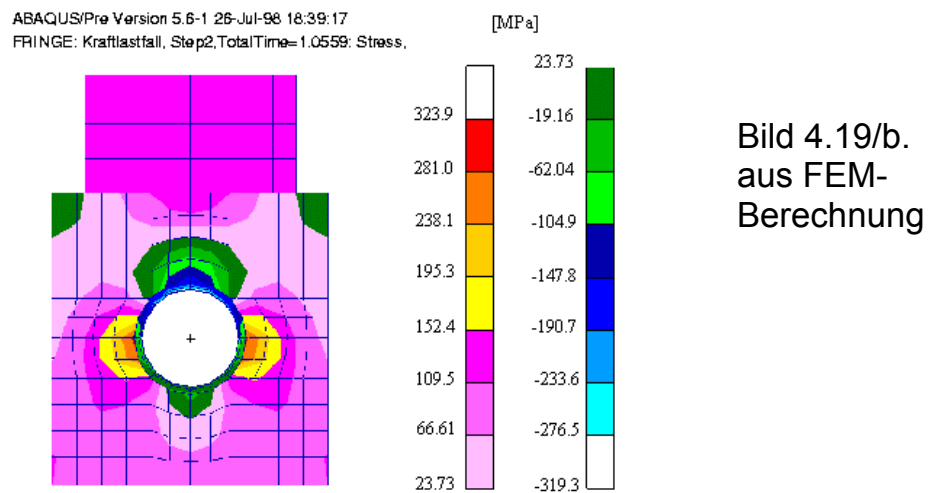
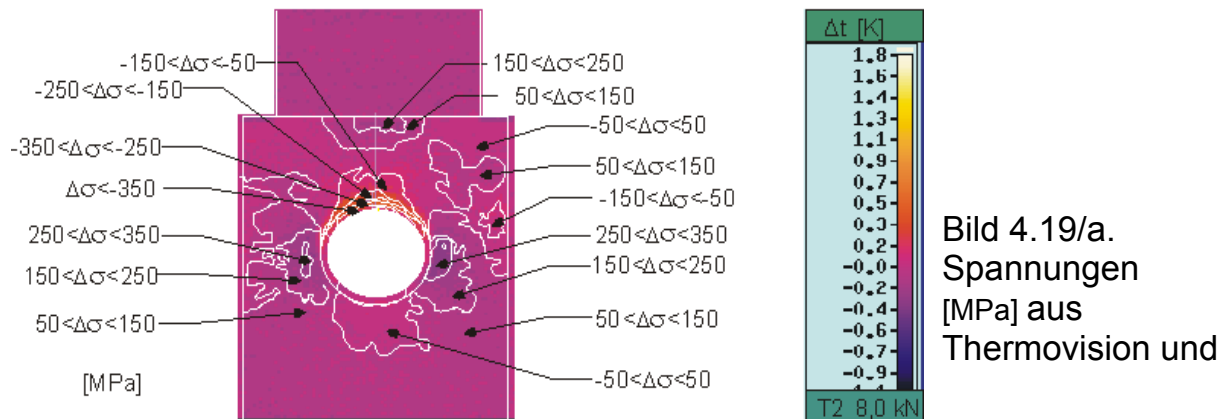
Bild 4.17 Versuchsanordnung



Bild 4.18
Rosettenverbindung
im Versagenszustand

Ziel war im zweiten Versuch einen Überblick von der Spannungsverteilung im Lochbereich zu bekommen. Deshalb wurde ein Abstand von 60 cm zwischen der Thermokamera und dem Messobjekt (Bild 4.17) gewählt. Von dieser Entfernung ließ sich die Verbindung gut analysieren. Die Belastung des Probestabes erfolgt mit stufenweise konstanten Lastamplituden, von 7.00 kN bis 9.00 kN in 1 kN-Stufen mit 100 Lastspielen pro Stufe, dann bis 11.00 kN in 0.4 kN-Stufen und 50 Zyklen pro Stufe, weiter bis 12.00 kN in 0.2 kN-Stufen und 50 Zyklen, endlich bis zum Bruch in 0.1 und 0.05 kN-Stufen und 50 Lastzyklen pro Stufe. Die Belastungsfrequenz beträgt 2 Hz. Das Versagen (Bild 4.18) erfolgt bei 12,55 kN.

In ausgewählten Laststufen wurden die Infrarotaufnahmen analysiert. Bild 4.19/a zeigt das Thermobild bei einer Zugkraft von 8.00 kN. Im rechten Bildrand kann man eine Farbskala finden, die den Temperaturänderungen entspricht. Zum Vergleich zeigt das Bild 4.19/b die Spannungen aus FEM-Rechnungen.



Den analogen Vergleich bei einer Belastung von 9.8 kN zeigen die Bilder 4.20/a und /b.. Das Bild 4.20/c zeigt eine Phase der automatischen Bildverarbeitung, wobei die einzelnen Temperaturbereiche schon separiert und zur besseren Erkenntnis mit künstlichen Farben gefärbt wurden.

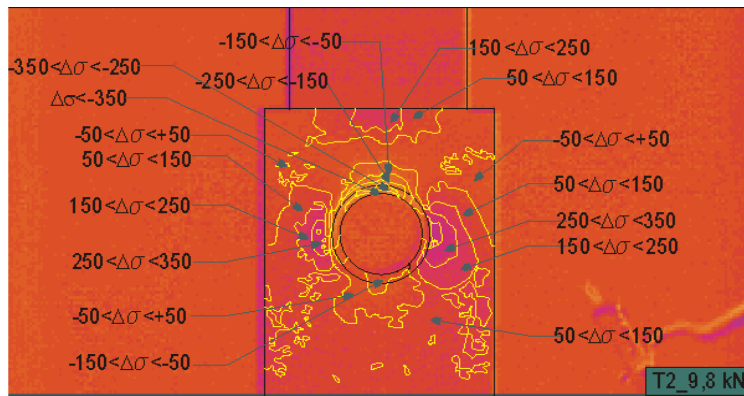


Bild 4.20/a.
Spannungsverteilung bei
 $F = 9,8 \text{ kN}$
aus Thermovision
[MPa]

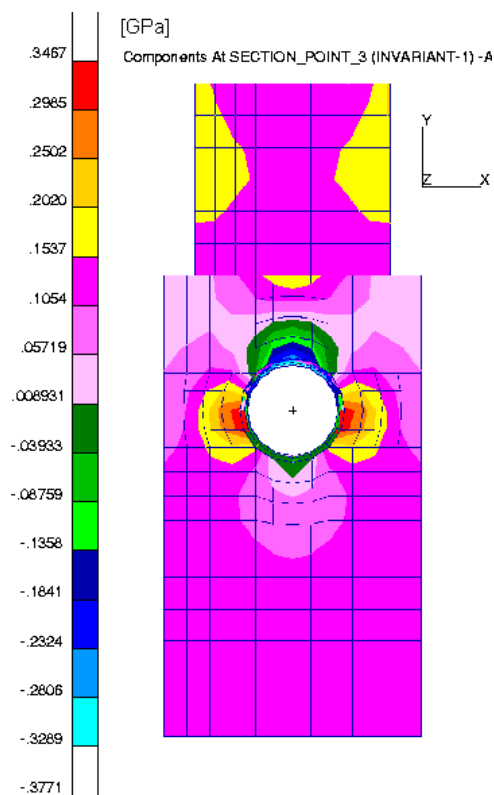


Bild 4.20/b. und aus FEM

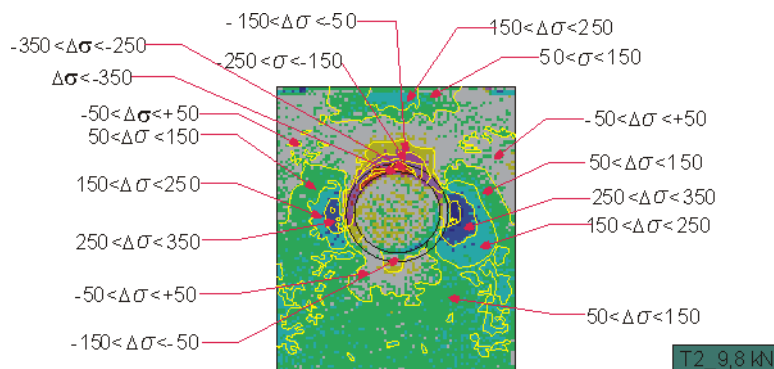


Bild 4.20/c
Ergebnissen mit dem
automatischen
Auswertungsverfahren
[MPa]

Die Auswertung ergab, dass die größten Druckspannungen am oberen Lochrand und die größte Zugspannungen beidseitig neben dem Loch entstanden. Die größten Temperaturänderungen betragen im oberen Rosettenflansch 0.4°K . Dieser Ring ist ca. 2 mm breit, deshalb zeigt dieses Bereich besonders große Spannungskonzentration. Um den Druckbereich besser untersuchen zu können, wurde im dritten Versuch die Infrarotkamera ohne Optik ganz in der Nähe von dem Probekörper aufgestellt (Bild 4.21). Von dieser Entfernung war nur ein Teil der Rosettenverbindung im Thermobild sichtbar.

Die Belastung des Probekörpers No.3 erfolgt nach der oben erklärten stufenweise Methode. Der Unterschied war die vergrößerte Belastungsfrequenz (4 Hz), dadurch konnte die Zyklenzahl in einer Laststufe auch erhöht werden. Die Belastung erfolgt beginnend von 7.00 bis 9.00 kN in 1.00 kN-Stufen mit 100 Lastspielen je Stufe, dann bis zum Bruch in 0.4 kN-Stufen und 80 Zyklen je Stufe. Der Bruchlast beträgt 12.00 kN (Bild 4.22).



Bild 4.21 Nahaufnahme mit Thermovision

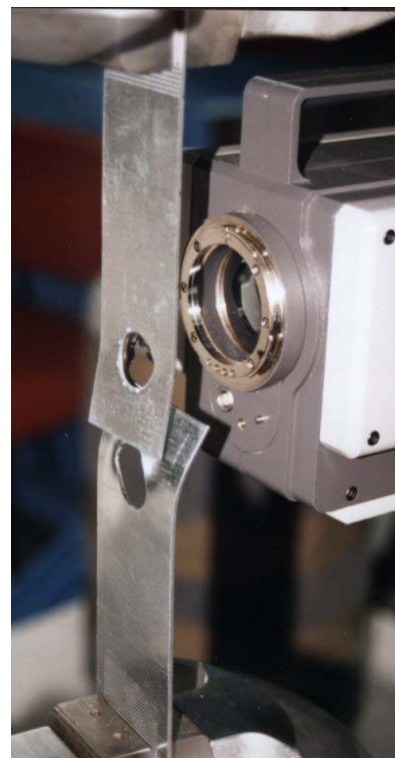


Bild 4.22 Das Versagen

Das Bild 4.23 dient zum Vergleich der mit Infrarotkamera gemessenen und mit FE berechneten Spannungen bei einer Belastung von 9.8 kN. Die Spannungsverteilung im Rosettenring ist deutlich erkennbar. Die große

Auflösung ermöglicht die Benutzung des automatisierten Verfahrens zur Separation der Temperaturbereiche.

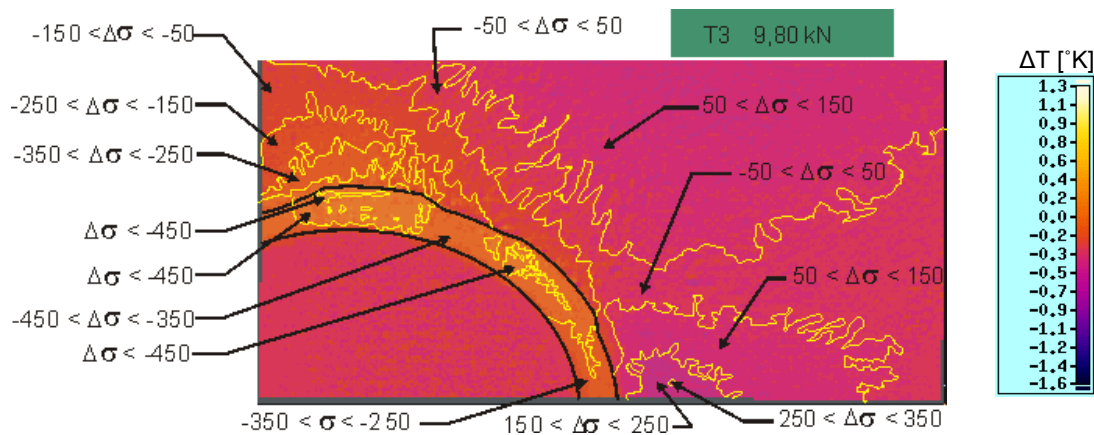


Bild 4.23/a Spannungen im Rosettenflansch aus Thermovision [MPa]

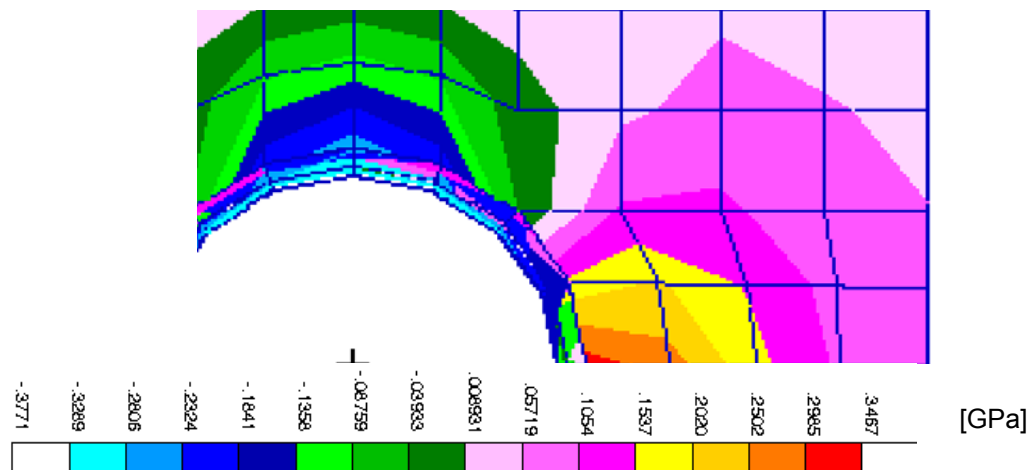


Bild 4.23/b und aus FEM, bei F= 9,80 kN Zugkraft

Die Spannungssummen stimmen mit den FEM-Ergebnissen annähernd überein. Damit ist das Verfahren zur Kalibrierung der FEM-Berechnungen besonders gut geeignet.

Die geometrische Auflösung der Thermoaufnahmen wurden bei Nahaufnahmen verbessert, die Spannungsbereiche können auch im Rosettenflansch entdeckt werden, aber das Ergebnis weist Störeffekte auf. Für eine bessere Auswertung ist eine Verfeinerung der Messwerte nötig.

4.7 Tragverhalten im Versagenszustand

Die Geschwindigkeit des AGEMA-Systems ermöglicht, 4-12 Thermobilder in einer Sekunde aufzunehmen. Die Plastizierung bildet eine Grenze zur Spannungsanalyse, aber die Thermografie ist auch in höheren Temperaturen anwendbar.

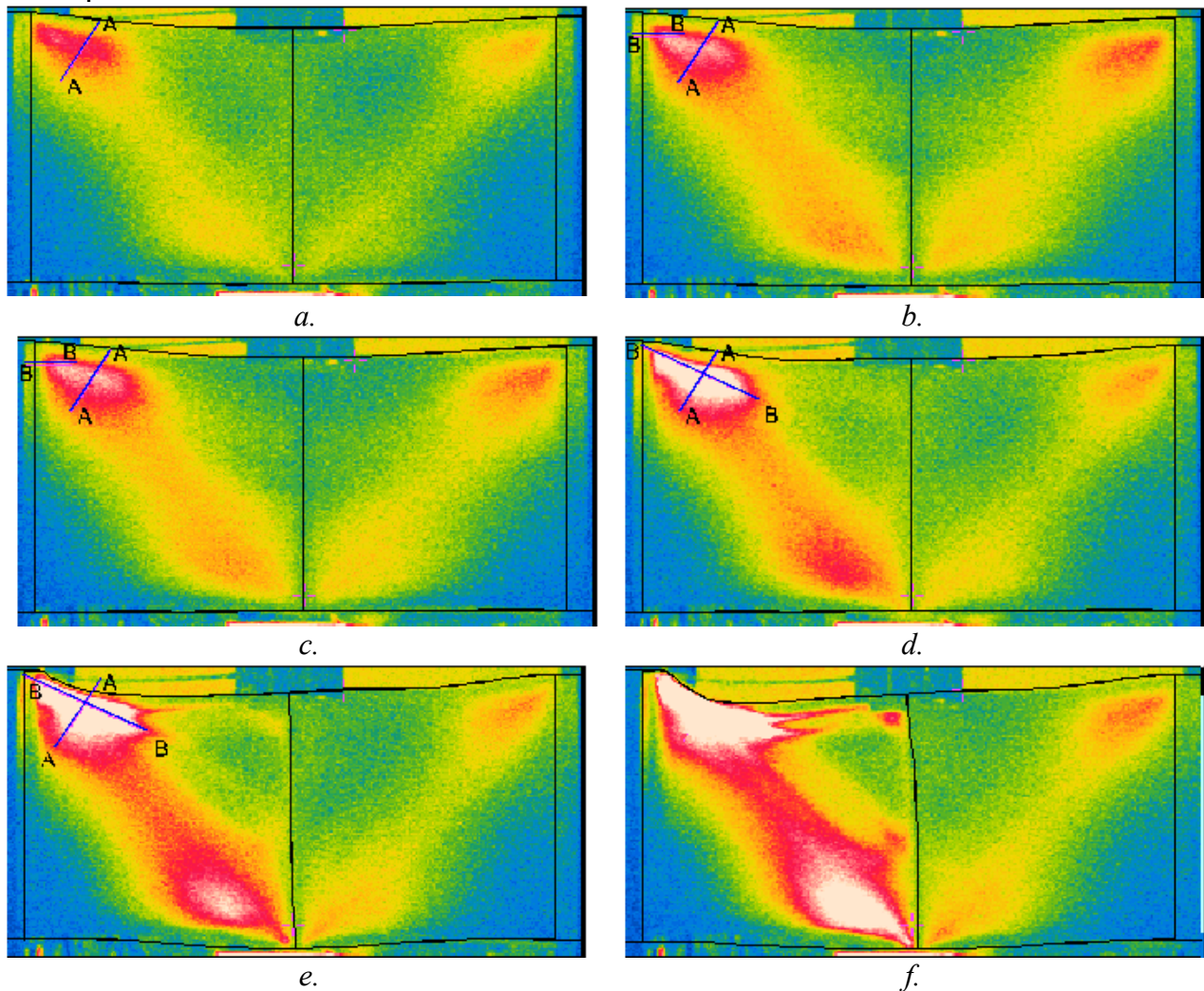


Bild 4.24/a-f. Thermoaufnahmen des Versagensmechanismus des dünnwandigen Trägers

In den Thermobildern auf Bild 4.24 lässt sich sehr anschaulich der Versagensmechanismus des Vollwandträgers über 2,4 s verfolgen. Die größten Temperaturen treten zunächst in der linken oberen Stegecke auf, dann erreichen langsam den Obergurt. Das Versagen kann deutlich beobachtet werden. Es beginnt in der linken oberen Verankerung des Zugfeldes. Der Obergurt verliert langsam die Unterstützung des Stegblechs und verformt sich. Am Ende erscheint ein Schweißnahttriss in der Ecke.

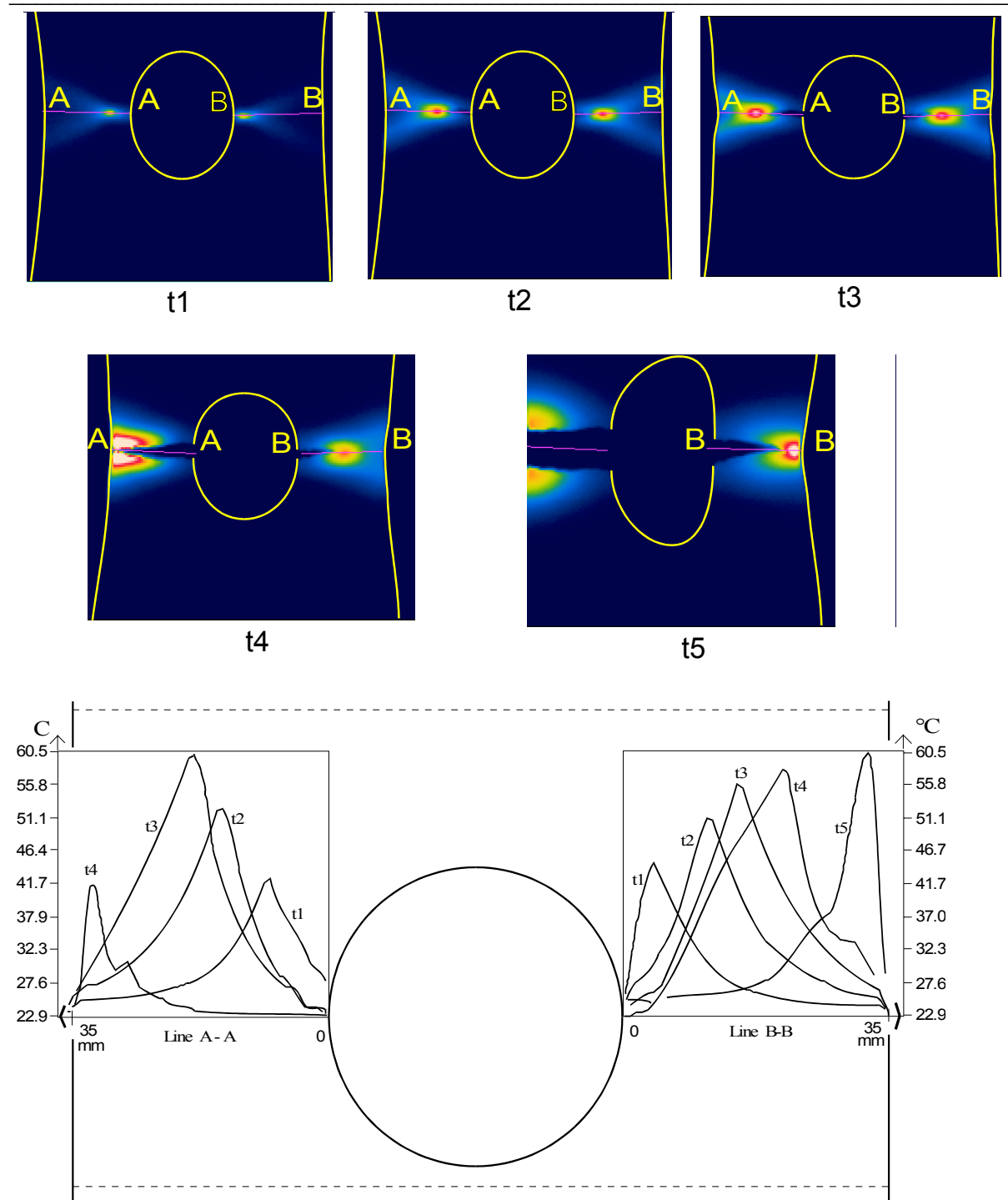
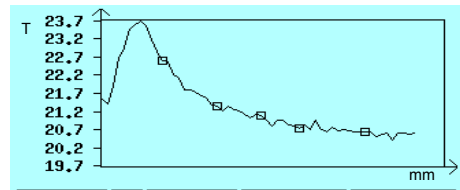
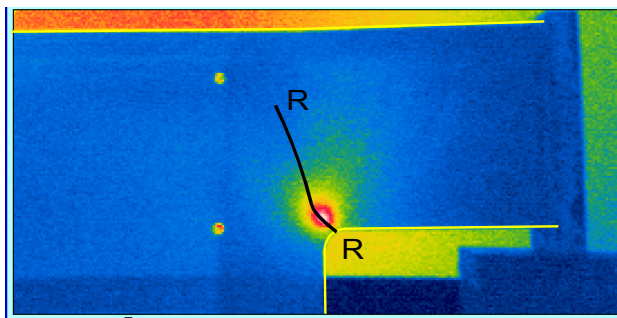


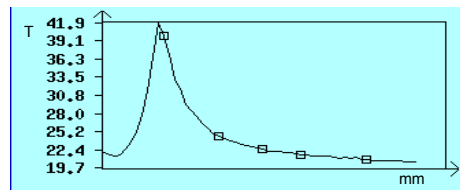
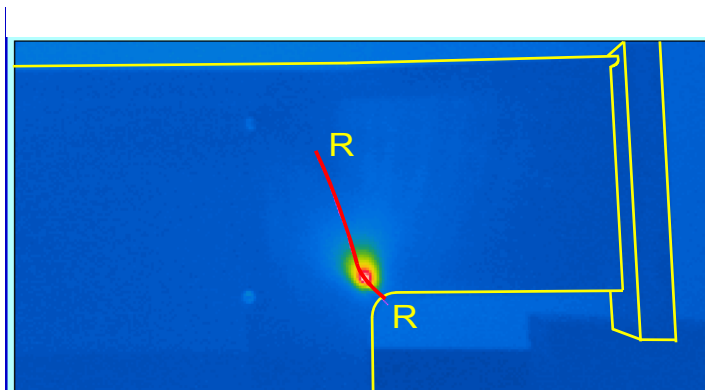
Bild 4.25. Zugbruch, Rissbeginn und –fortschritt mit zugehörigen Temperaturen

Die Thermobildserie von Bild 4.25 verdeutlicht den Zugbruch des Zugstabes. 1 s nach Rissbeginn erreicht der Riss den anderen Blechrand. Die dazugehörigen Temperaturen sind beträchtlich: beim Anriss bis ca. 40°C und beim Riss-Spitze bis ca. 60°C. In den Temperaturkurven gehört zur Riss-Spitze die größte Temperatur.



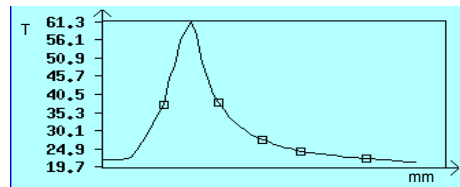
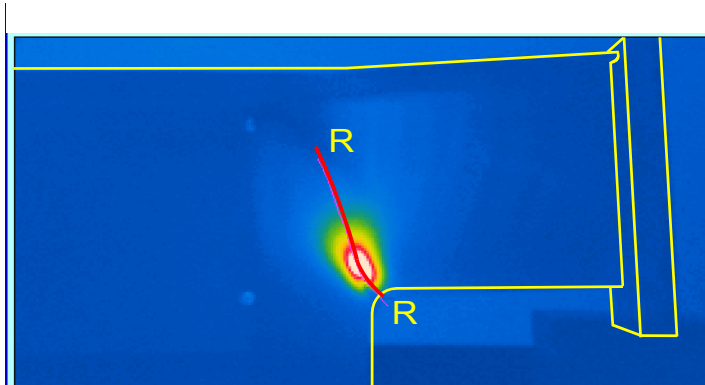
Temperaturverteilung entlang der Rißlinie R-R

Bild 4.26/a. Thermobild sofort nach dem Anriss (t_1)



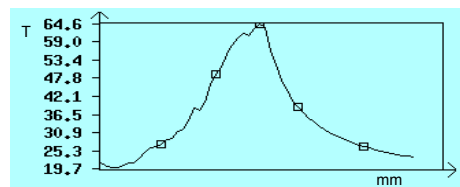
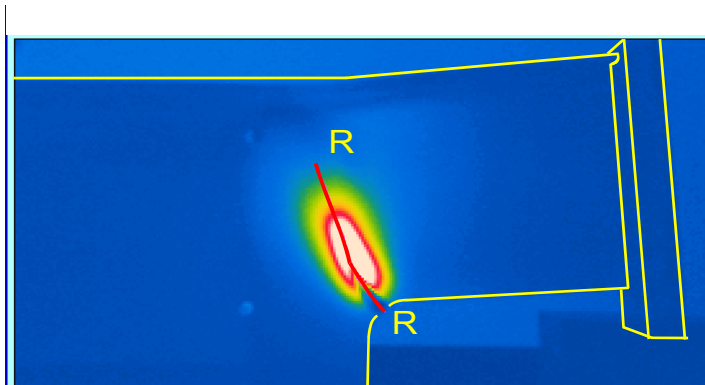
Temperaturverteilung entlang der Rißlinie R-R

Bild 4.26 /b Thermobild ($t_1 + 0.3$ sec)



Temperaturverteilung entlang der Rißlinie R-R

Bild 4.26/c Thermobild ($t_1 + 0.6$ sec)



Temperaturverteilung entlang der Rißlinie R-R

Bild 4.27/d Thermobild ($t_1 + 0.8$ sec)

Ebenso kann das Versagen des ausgeklinkten Trägers beobachtet werden. Nach dem Anriss wuchsen die gemessenen Temperaturen innerhalb von 0,8 s von ca. 24°C auf ca. 65°C beim Bruch. Die Versagensbildserie des Trägers zeigt Bild 4.26.

Die „Ausknöpfung“ der Rosetten-Verbindung kann in der Thermobildserie auf Bild 4.28 verfolgt werden. Die größten Spannungen treten am oberen Rosettenflansch auf. Das Versagen hat immer dort begonnen. Die Temperaturen entlang der Messlinie C-D zeigen hohe Werte (von ca. 34°C bis ca. 48°C) im Rosettenflansch.

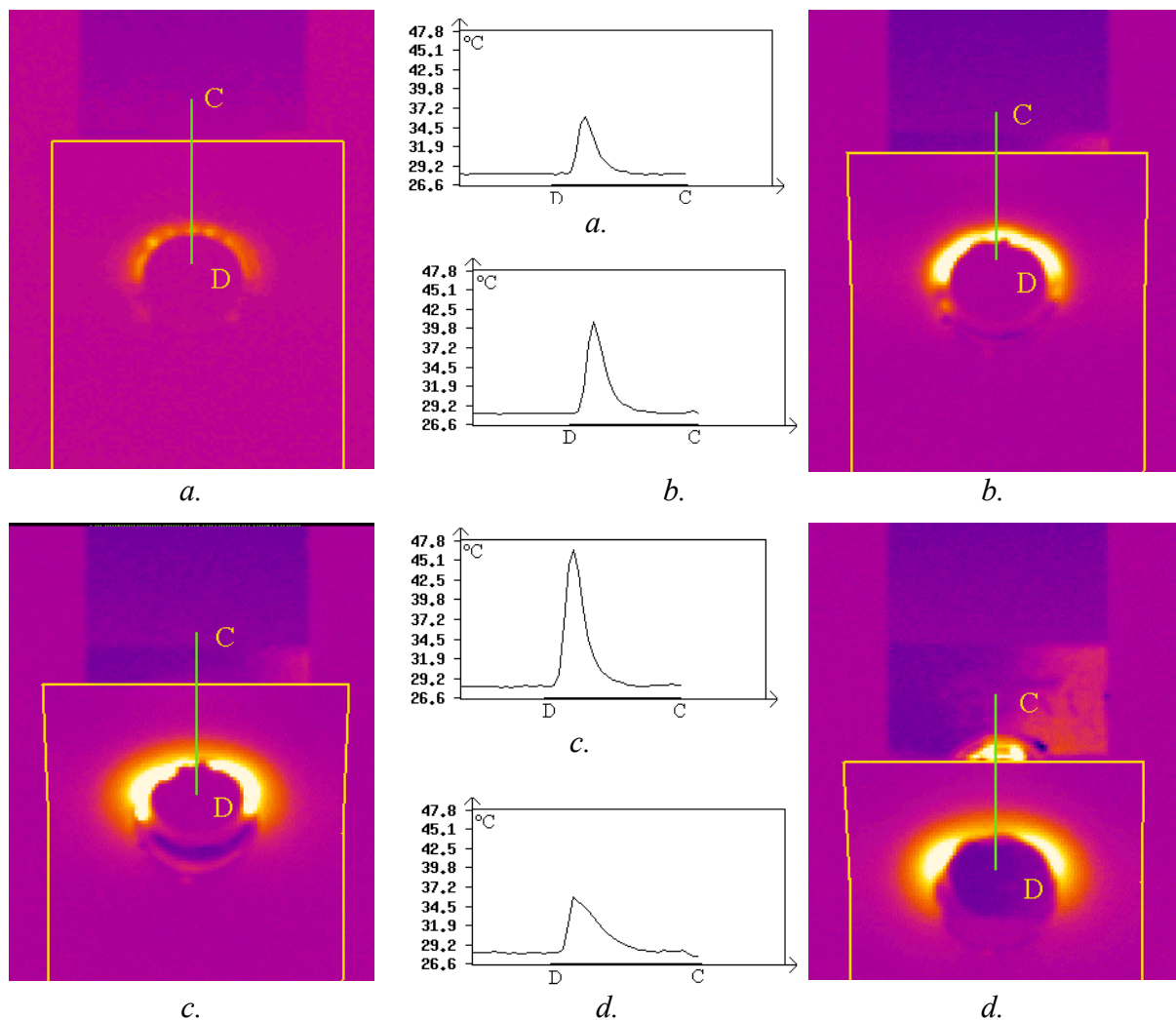


Bild 4.28. Tragverhalten der Rosetten-Verbindung im Traglastzustand

Aus den Ergebnissen wurde deutlich, dass die größten Temperaturänderungen immer während des Versagens auftreten. Den Rissbeginn zeigt ein Temperatursprung auf 25-40°C, die Temperatur während

des Rissfortschritts erhöht sich auf 60-65°C. Der wärmste Punkt an der Messlinie zeigt immer die Riss-Spitze.

Ein sehr interessante und wichtige Anwendungsbereich des Thermovisions-Verfahrens kann die Untersuchung von Stahlbauteilen im Versagenszustand sein. Während im plastischen Bereich die herkömmlichen Messverfahren nur begrenzt anwendbar oder ganz unbrauchbar sind, ermöglicht die Thermovision, den Versagensmechanismus des Bauteils sogar im plastischen Bereich bis zum Bruch zu verfolgen. Es ist auch möglich, den Rissbeginn zu bestimmen und die Rissausbreitung zu beobachten. Die Temperaturänderungen sind dabei hoch, die Umrechnung in Spannungen benötigt eine grundsätzliche Untersuchung des thermoplastischen Effektes.

5 Zusammenfassung, Erfahrungen und Ausblick

Nach der Auswertung der zwei Versuchsserien und der grundsätzlichen Bearbeitung der Ergebnisse lassen sich die in der Einleitung gestellten Fragen beantworten. Die eigene Ergebnisse meiner Forschungen lassen sich folgendermaßen zusammenfassen.

1. Die Thermovision mit einer konventionellen Thermokamera eignet sich zur experimentellen Untersuchungen mit der Methode der thermoelastischen Spannungsanalyse.

- 1.1 Es wurde ein Messverfahren entwickelt. Es enthält

- die Aufnahme der Thermobild-Serien,
- die Erstellung der Min-Max- und Differenz-Bilder,
- die Weiterverarbeitung der Thermobilder,
- die Bestimmung der Bildbereiche mit gleicher Temperatur,
- die Umrechnung die Temperaturänderungen in Spannungssummen.

- 1.2 Das Messverfahren wurde auch mit eigenen Werkzeugen ergänzt (thermischer Indikator, automatisiertes Verfahren zur Separation der Thermobereiche usw.).

2. Die Anwendbarkeit des Infrarotmessverfahrens mit Thermovision zur Beurteilung und Überwachung des Tragverhaltens typischer Konstruktionsteile im Stahlbau wurde untersucht. Zwei Versuchsserien, insgesamt 6 Versuchen wurden durchgeführt, um die Anwendungsbereiche des Verfahrens zu klären und aus den Erfahrungen Vorteile und Grenzen der Methode zu bestimmen.

- 2.1 Die thermoelastische Spannungsanalyse mit einer konventionellen Infrarotkamera lässt sich nach den Erfahrungen zur Beurteilung des Tragverhaltens von Stahlbauteilen erfolgreich benutzen. Die Mehrheit der Vorteile der thermoelastischen Spannungsanalyse kann im Stahlbaubereich übernommen werden.

- Das Verfahren ist berührungslos, rückwirkungs- und zerstörungsfrei, nur ein optischer Kontakt ist nötig.
- Die Messungen können am originalen Stahlbauteil durchgeführt werden, Modellkörper sind nicht erforderlich, Vorarbeiten sind kaum nötig.

- Nicht nur einfache Elemente, sondern auch flächenartige Bauteile und komplexe Strukturen, Verbindungen usw. können einfach analysiert werden.
- Das Verfahren liefert die Messergebnisse sofort in digitaler Form und flächenhafter Darstellung. Das erleichtert die Überwachung des Messvorganges, die Auswertung und Weiterverarbeitung der Ergebnisse.
- Die Spannungskonzentrationsbereiche sind wegen der größeren Temperaturänderungen schon bei niedriger Belastung bemerkbar.
- Der Versagensmechanismus des Bauteils kann verfolgt werden.

2.2 Die Grenzen der Methode finden ihre Ursache einerseits in den klassischen Nachteilen der TSA, andererseits in den Eigenschaften des Thermovisionssystems. Die wichtigsten Nachteile der Thermovision gegenüber dem kommerziellen OMETRON System sind folgende:

- Die thermische Empfindlichkeit der Kamera beträgt 0,1K, damit kann nur eine Spannungsauflösung von 102 N/mm^2 erreicht werden. Allerdings gibt es schon ein Nachfolgemodell von AGEMA 900(Thermacam 3000) mit einer Auflösung von 0,02K.
- Es gibt keine elektronische Kopplung zwischen der Belastung und Thermoaufnahmen.
- Die Messergebnisse werden durch das „Rauschen“ stark beeinflusst.

2.3 Die Vorteile des Infrarotmessverfahrens mit konventioneller Thermokamera können in folgendermaßen ausgenutzt werden:

- Die Empfindlichkeit des Systems ist genügend, um qualitative Ergebnisse des gesamten Stahlbauteils zu bekommen. Es ermöglicht die Bestimmung der Spannungskonzentrationsbereiche und eine qualitative Analyse der Spannungsverteilung.
- Wenn nur ein Teil des Versuchskörpers untersucht wird, kann auch die quantitative Auswertung der Temperaturwerte erfolgen. Die Übereinstimmung zwischen den Spannungen aus Thermovision, DMS-Messungen und FEM-Berechnungen ist im elastischen Bereich gut. Die beste Übereinstimmung konnte bei der Auswertung der Linienmessungen erreicht werden.
- Die quantitative Bestimmung der Spannungsverteilung ist nur sehr begrenzt möglich. Nur die Nahaufnahmen mit der Thermokamera ohne Optik bieten eine vernünftige Auflösung für die genauere Trennung der Temperaturbereiche.

- Die Messergebnisse eignen sich nicht (auch die Nahaufnahmen am Rosettenflansch) wegen des großen Rausches und den sehr speziellen Blickwinkel (ohne einfache Randbereiche, keine bekannten Spannungsbereiche usw.) für die Spannungsseparation. Deshalb konnten keine erfolgreichen Berechnungen für die Spannungsseparation aus der Hauptspannungssumme durchgeführt werden.

2.4 Nach den Erfahrungen kann das Infrarotmessverfahren mit konventioneller Thermokamera in verschiedenen Bereichen der Stahlbauforschung erfolgreich benutzt werden.

- Das Verfahren ermöglicht einen schnelleren Überblick über die Spannungsverteilung des gesamten Stahlbauteils, die Entdeckung von Spannungskonzentrationsbereichen, und damit die Sondierung kritischer Bereiche für weitere Untersuchungen.
- Es ermöglicht eine schnelle Vorhersage späterer Schädigungszustände.
- Ein sehr interessanter und wichtiger Anwendungsbereich des Verfahrens ist die Untersuchung der Stahlbauteile im Versagenszustand. Während im plastischen Bereich die herkömmlichen Messverfahren nur begrenzt anwendbar oder ganz unbrauchbar sind, ermöglicht die Thermovision, den Versagensmechanismus des Bauteils sogar im plastischen Bereich bis zum Bruch zu verfolgen.
- Es ist auch möglich, den Rissbeginn zu bestimmen und die Rissausbreitung zu beobachten.

3. Die Weiterentwicklung und Verbesserung der Infrarotmessverfahren mit konventionellen Thermokameras bietet weitere Möglichkeiten, und kann in verschiedenen Richtungen erfolgen.

- Die Steuerung der Versuchsdurchführung kann mit einer Verkoppelung der hydraulischen Prüfmaschine und das Thermovisionssystem ergänzt werden. Der Zeitpunkt der Thermoaufnahmen kann dann an den Last-Zeit-Verlauf angepasst werden, womit eine erhebliche Verbesserung der Messgenauigkeit erreicht wird.
- Weitere Untersuchungen sind nötig, um die einzelnen Spannungen aus der Hauptspannungssumme herleiten zu können.
- Eine grundlegende theoretische und experimentelle Untersuchung des thermoplastischen Effektes ist Voraussetzung um quantitative Aussagen bei höheren Spannungsniveaus machen zu können.

Literaturverzeichnis

- [1] J. Scheer, H.-J. Scheibe und D. Kuck: Zum Verhalten ausgeklinkter Träger unter zyklischer Beanspruchung. Bauingenieur 65 (1990), 463-468.
- [2] Thomson, W. (Lord Kelvin): On the dynamical theory of heat. Trans. Roy. Soc. Edinburgh, 20(1853), 261-283.
- [3] Feickert, W.: Ermittlung des vollständigen Spannungszustands mit dem Verfahren der Thermoelastischen Spannungsanalyse. Fortschrittberichte, VDI Reihe 18 Nr. 154. Düsseldorf, VDI-Verlag 1994.
- [4] Potter, R.T, - Greaves, L.J: The application of thermoelastic stress analysis techniques to fibre composites, Proc. SPIE, 817, (1987), 134-146.
- [5] Wong, A..K. – Sparrow, J.G. – Dunn, S.A. : On the revised Theory of thermoelastic effect. J. of Phys. Chem. Solids, 49 (1988), No. 4. 395-400.
- [6] Owens, R.H. – Reuter, W.J.: Cast K-Joint Lorry Knuckle Rail Wheel. Ometron Report No. 8048, 1986.
- [7] Angerer, S. – Fuchshuber, K. – Hutmann, P. – Kolitzsch, C.: Thermoelastische Spannungsanalyse bei der Erprobung und Entwicklung von Kfz-Bauteilen Materialprüfung, 29, Nr.6. (1987)
- [8] Gough, J.: - Manchester Phil. Mem., 2nd Ser. (1805) Nr.1. 288-295.
- [9] Weber, W.: Über die spezifische Wärme fester Körper, insbesondere der Metalle. Ann. Phys. Chem., Bd. 10 (1830), 177-213
- [10] Joule, J.P.: - Phil. Trans., Bd. 149 (1859), 91-130
- [11] Haga, H.: - Ann. Phys. Chem., Bd. 15 (1882), 1-18
- [12] Turner, C.A.P.: - Trans. Am. Soc. Civ. Eng., Bd. 48 (1902), 140-
- [13] Cooker, E.G.- McKergow, C.M.: - Can. Roy. Soc. Proc. and Trans. (1904), Nr. 10.

- [14] Compton, K.T.- Webster, D.B.: Temperature changes accompanying the adiabatic compression of steel. Phys. Rev., Bd. 5. (1915), 159-166.
- [15] Tammann, G.- Warrentrup, H.: Die Temperaturänderungen beim Recken von Metallstäben. Zeitschrift für Metallkunde, Bd. 29. (1937), 84-88.
- [16] Rocca, R.- Bewer, M.B.: The thermoelastic effect in iron and nickel as function of temperature. Trans. AIME, Bd. 188. (1950), 327-333.
- [17] Belgen, M.H.: Structural stress measurement with an infrared radiometer. ISA Trans., Bd. 6.(1967), 49-53.
- [18] Harwood, N.- Cummings, W.M.(ed.): Thermoelastic Stress Analysis. IOP Publishing Ltd.(Adam Hilger), 1991.
- [19] Stanley, P: Applications and potential of thermoelastic stress analysis. Journal of Materials Processing Technology, 64(1997), 359-370.
- [20] Harig, H. – Müller, K.: Untersuchungen zur zyklischen Verformung gekerbter Stahlproben unter Nutzung des thermoelastischen Effektes. Materialprüfung, Band 28 (1986), Nr.11, 357-361
- [21] Schlicht, O. – Krapf, K.-G. – Richter, M.: Rißdetektion mit der Thermoelastischen Spannungsanalyse. Materialprüfung, Band 37 (1995), 186-190.
- [22] Stanley, P. – Dulieu-Smith, J.M.: The determination of crack-tip parameters from thermoelastic data. Experimental Techniques, March/April 1996, 21-23.
- [23] Stanley, P: Stress separation from SPATE data for a rotationally symmetrical pressure vessel, Proc. Of Intl. Conf. On Stress and Vibration, 1989, SPIE Vol. 1084, 72-83.
- [24] Ryall, T.G. – Wong, A.K.: Determining stress components from thermoelastic data – a theoretical study, Mechanics of Materials, 1988, 205-214.

- [25] Huang, Y.M.- AbdelMohsen, H.H.- Rowlands,R.E.: Determination of individual stresses thermoelastically. *Experimental Mechanics*, 30 (1990), 88-94.
- [26] Huang, Y.M.- Rowlands,R.E.-Lesniak, J.R: Simultaneous stress separation, smoothing of measured thermoelastic isopachic information and enhanced boundary data. *Experimental Mechanics*, 30 (1990), 398-403.
- [27] Rauch, B.J.- Rowlands,R.E.: Determining reliable edge isopachic data from interior thermoelastic measurements. *Experimental Mechanics*, 35 (1995), 174-181
- [28] Rauch, B.J.- Rowlands,R.E.: Filtering thermoelastically measured isopachic data. *Experimental Mechanics*, 37 (1997), 387-392.
- [29] Stanley, P. – Dulieu-Smith, J.M.: Devices for the experimental determination of individual stresses from thermoelastic data. *Journal of Strain Analysis*, Vol.31 (1996), No.1. 53-63.
- [30] Zhang, D.- Enke,N.F.-Sandor, B.I: Thermographic stress analysis of composite materials. *Experimental Mechanics*, 30 (1990), 68-73.
- [31] Feng, Z.- Zhang,D.- Rowlands,R.E.-Sandor, B.I: Thermoelastic determination of individual stress components in loaded composites. *Experimental Mechanics*, 32 (1992), 89-95.
- [32] Lesniak, J.- Bartel, B: Elevated-Temperature TSA furnace design. *Experimental Techniques*, March/April (1996), 10-13.
- [33] Offermann, S.- Beaudoin,J.L.- Bissieux.C.- Frick,H.: Thermoelastic stress analysis under nonadiabatic conditions. *Experimental Mechanics*, 37 (1997), 409-413.
- [34] Lin,S.T.- Miles, J.P.- Rowlands,R.E.: Image enhancement and stress separation of thermoelastically measured data under random loading. *Experimental Mechanics*, 37 (1997), 225-231.
- [35] Drdácky, M.- Bartos, F.- Lesák, J.: Perforated plates in thin-walled structures. Preliminary Report Of the Intl. Colloquium on Stability of Steel Structures, Hungary, 1995, I/217-224.

- [36] Szabó, Gy.- Kazi, I.: Zur Beurteilung der Beanspruchbarkeit von Baustählen mit Hilfe der Thermovision. (ungarisch). Forschungsinstitut Dunafer, Ungarn, 1993.
- [37] Pasternak, H.- Horváth, L.: Untersuchung zyklisch beanspruchter Stahlbauteile mit Hilfe der Thermovision. Stahlbau, 66(1997), Heft 3, 127-135.
- [38] Breuckmann, B.: Bildverarbeitung und optische Messtechnik in der industriellen Praxis. Franzis Verlag, München, 1993
- [39] Thermovision 900 System. Handbuch. AGEMA GmbH, 1993.
- [40] Gaussorgues, G.: Infrared Thermography. Chapman & Hall, London, 1994.
- [41] Mäkeläinen, P.- Kesti, J.- Kaitila, O.-Sahramaa, K.J.: Study on light-gauge steel roof trusses with rosette connections. 14th Specialty Conference on Cold-Formed Structures, St. Louis, USA, 1998.

A1. Spannungsfelder des gelochten Zugstabes aus Thermovision

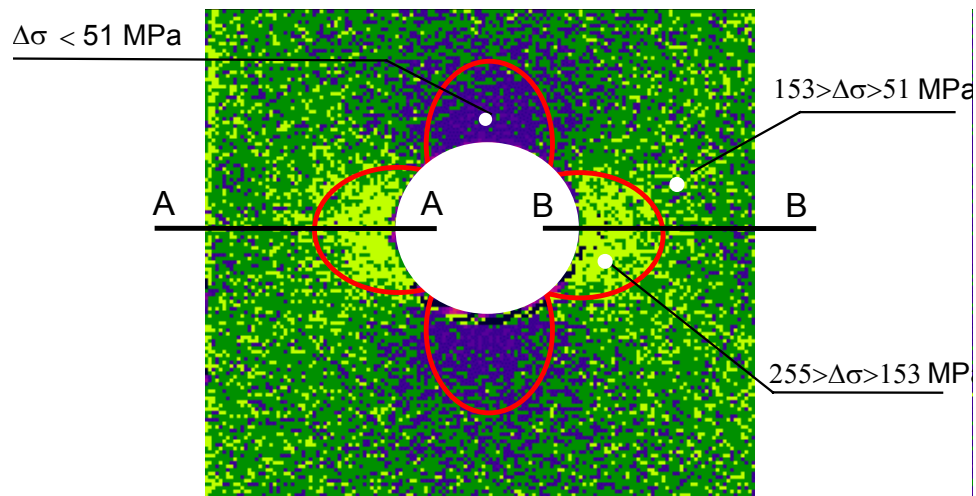


Bild A1/ a Isothermen und Spannungen bei F = 50 kN

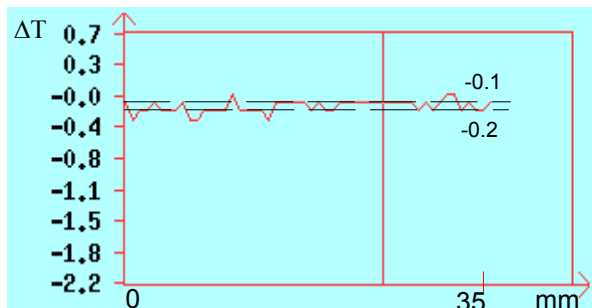


Bild A1 / b. Thermische Profile, Schnitt A-A

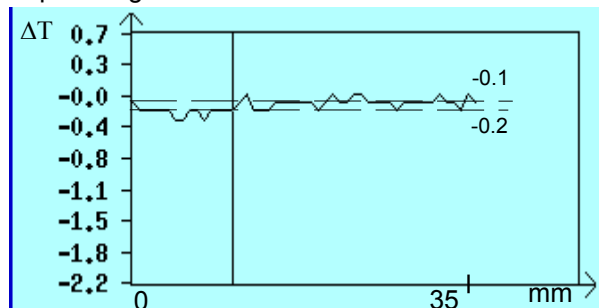


Bild A1 / c. Thermische Profile, Schnitt B-B.

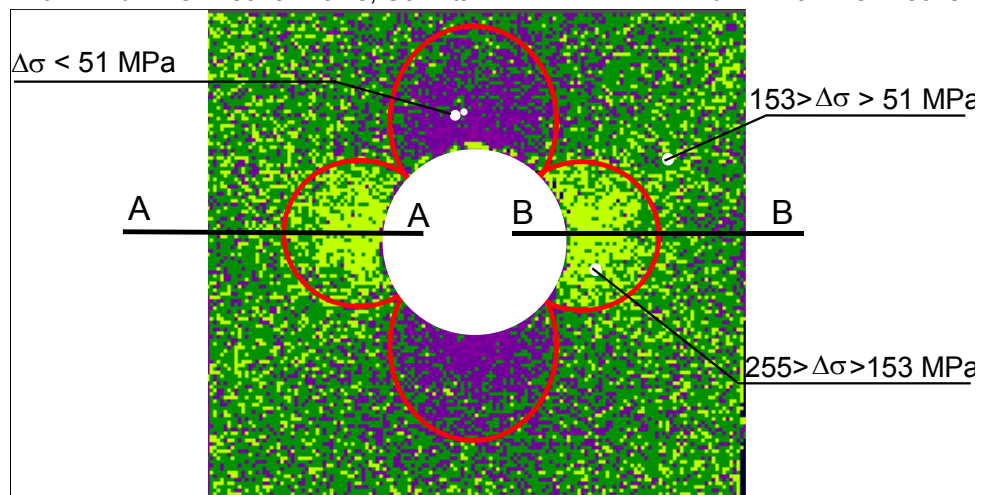


Bild A2 /a. Isothermen und Spannungen bei F = 55 kN

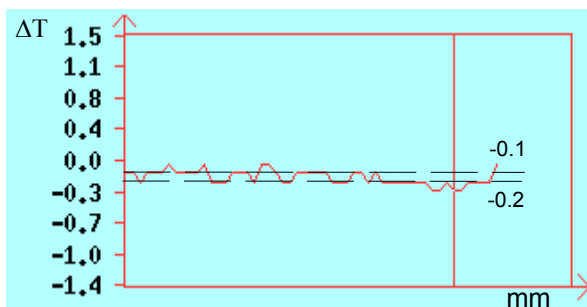


Bild A2 /b. Thermische Profile, Schnitt A-A

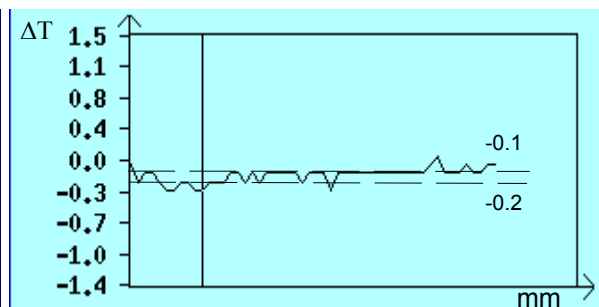


Bild A2 /c. Thermische Profile, Schnitt B-B.

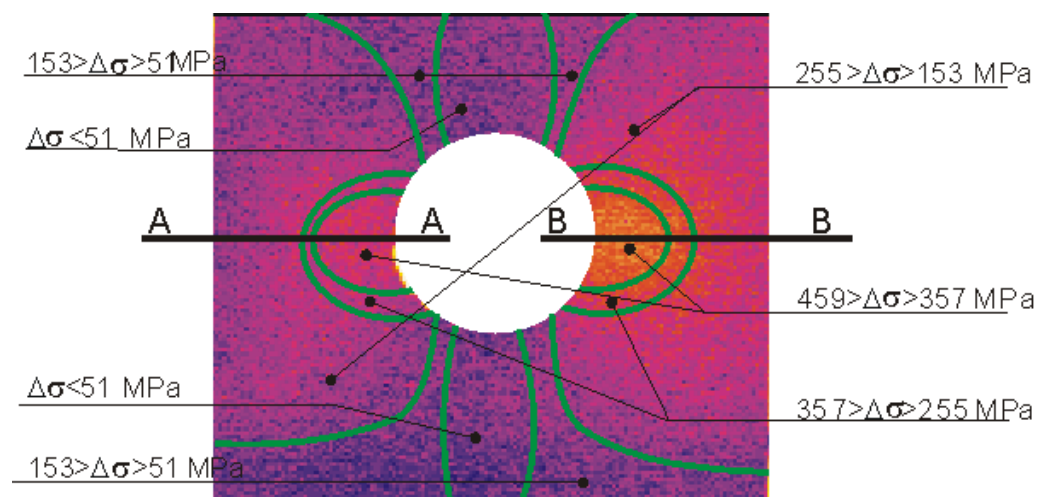


Bild A3/a. Thermobild und Spannungen bei $F = 70 \text{ kN}$

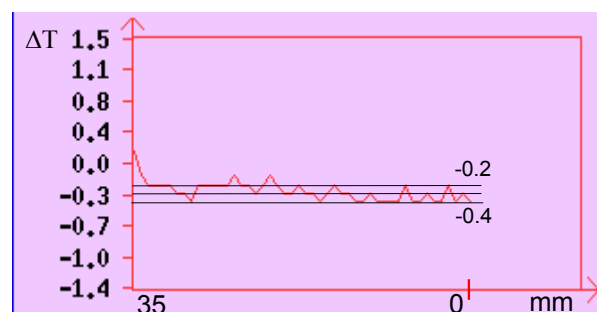


Bild A3/b. Thermische Profile, Schnitt A-A

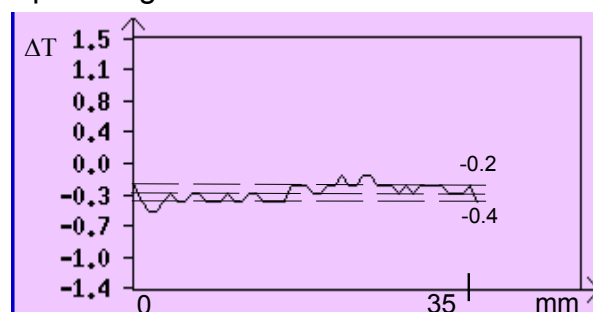


Bild A3/c. Thermische Profile, Schnitt B-B

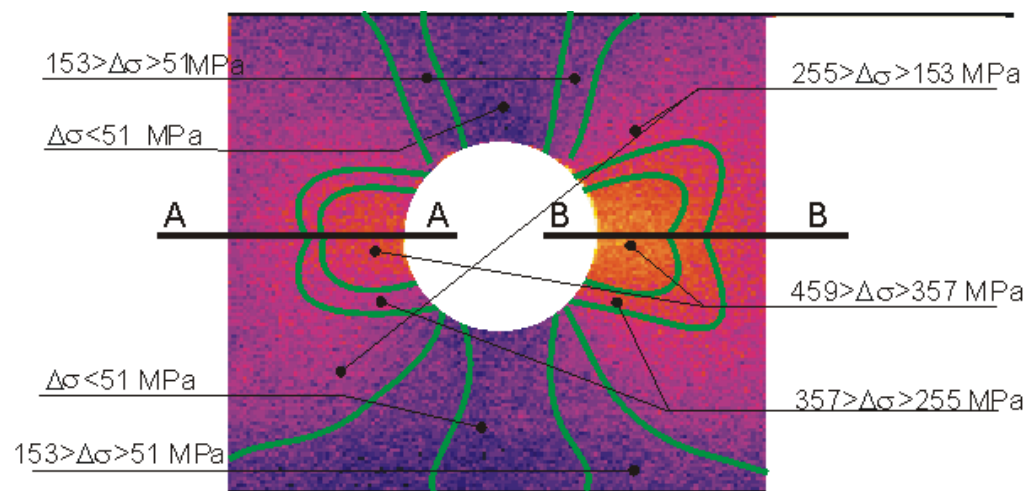


Bild A4 /a. Thermobild und Spannungen bei $F = 80 \text{ kN}$

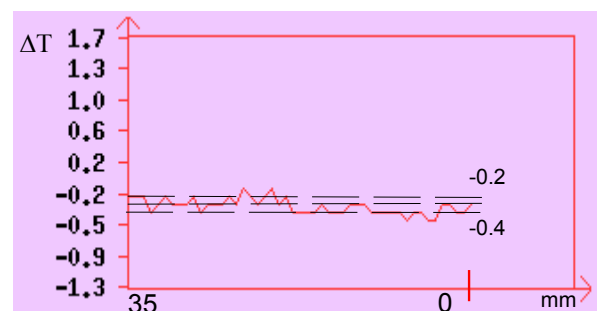


Bild A4 /b. Thermische Profile, Schnitt A-A

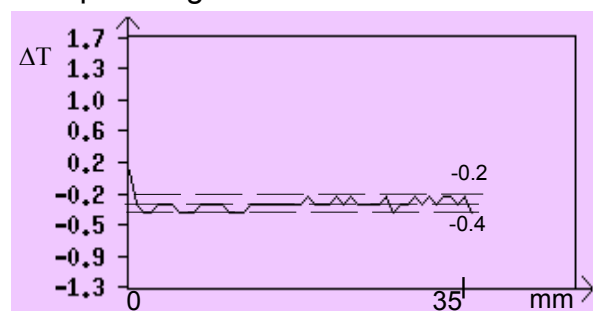


Bild A4/c. Thermische Profile, Schnitt B-B.

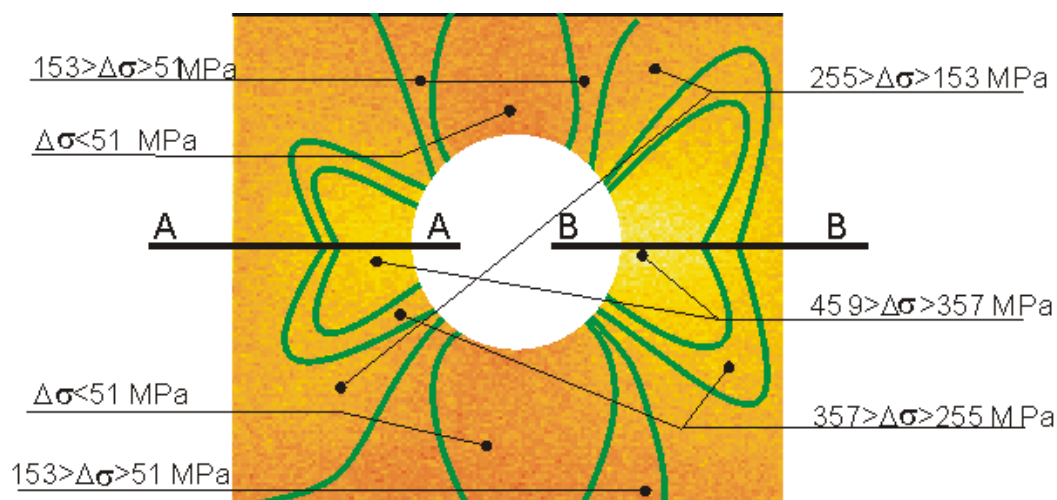


Bild A5 /a Thermobild und Spannungen bei $F = 86 \text{ kN}$

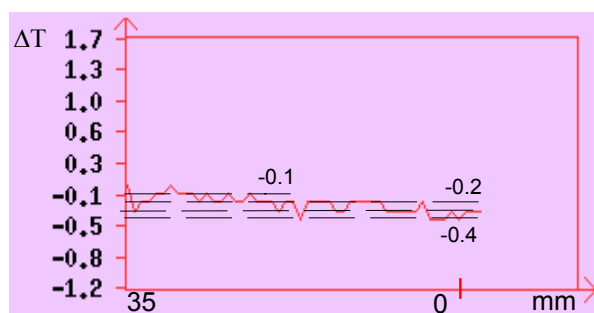


Bild A5 /b. Thermische Profile, Schnitt A-A

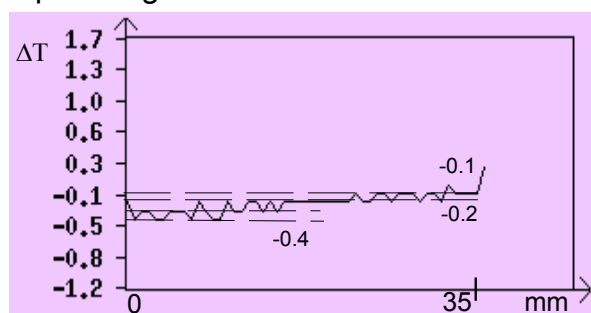


Bild A5 /c. Thermische Profile, Schnitt B-B.

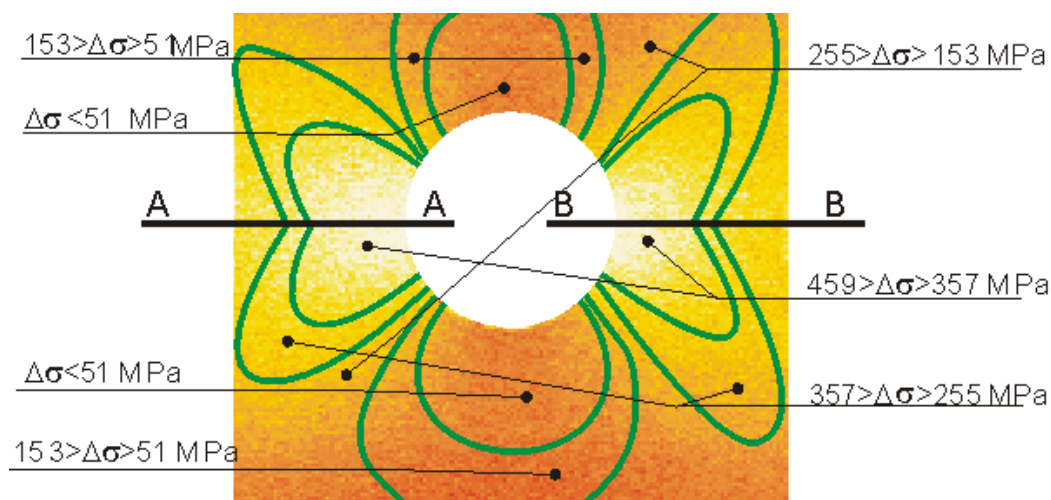


Bild A6 /a Thermobild und Spannungen bei $F = 95 \text{ kN}$

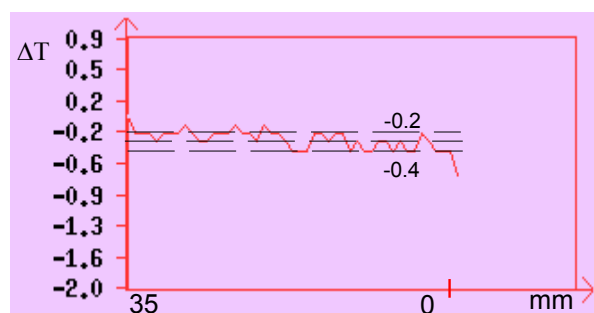


Bild A6/b. Thermische Profile, Schnitt A-A

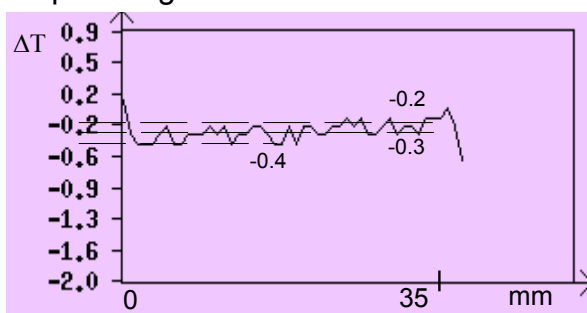


Bild A6 /c. Thermische Profile, Schnitt B-B.

A2. Spannungsfelder des gelochten Zugstabes aus FEM-Berechnungen

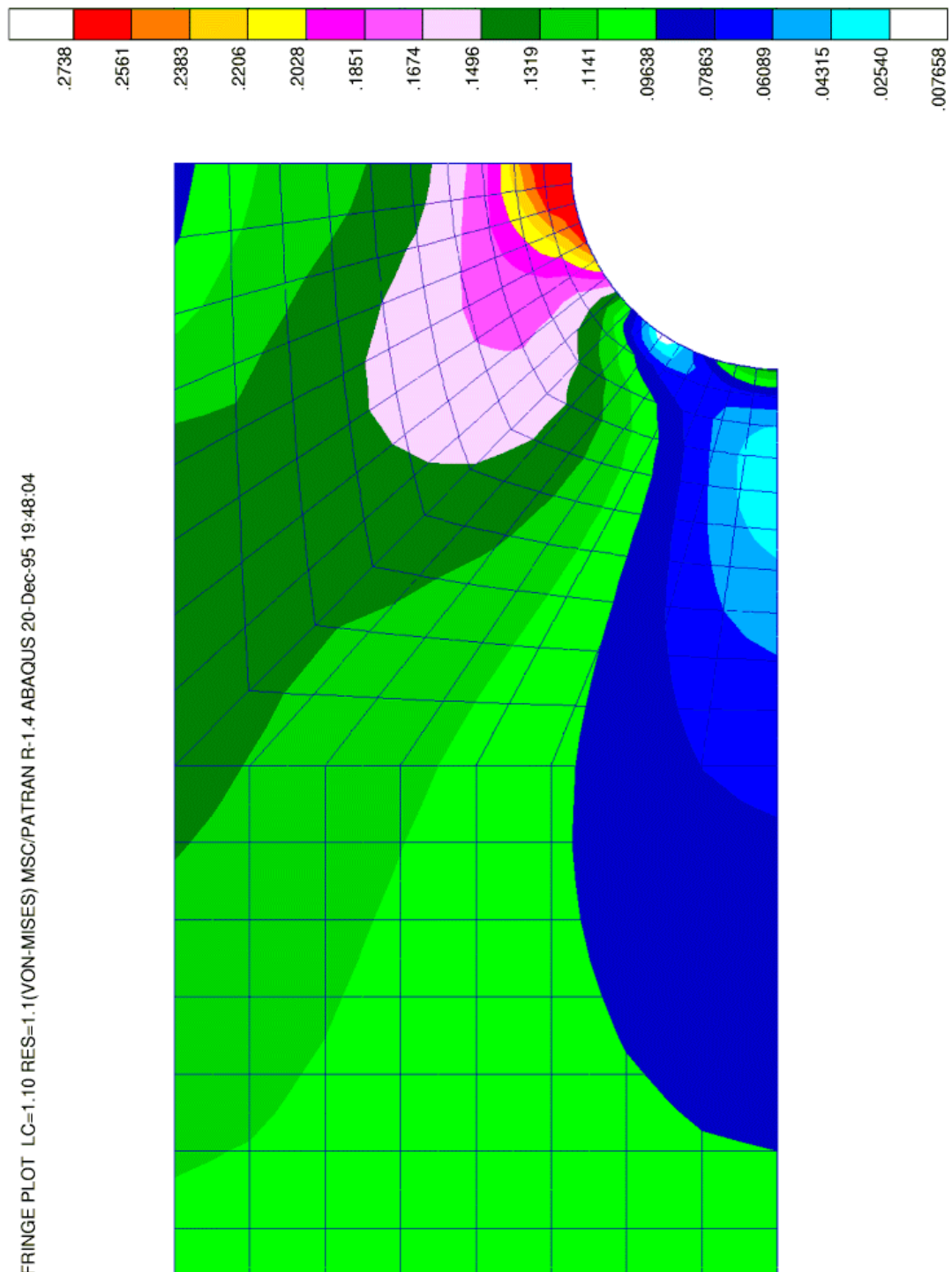


Bild A7. Spannungen aus FEM bei $F = 50 \text{ kN}$

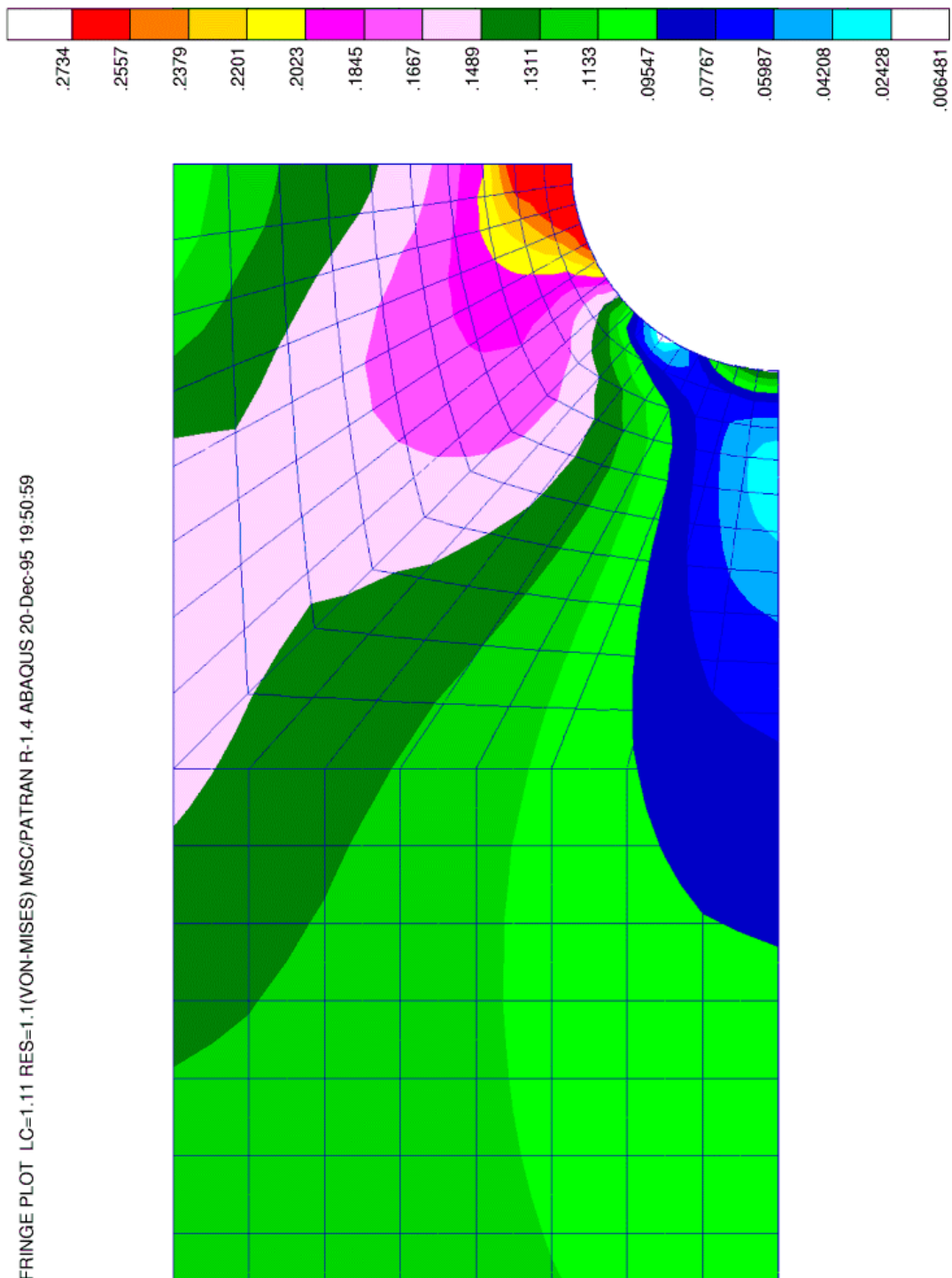


Bild A8. Spannungen aus FEM bei $F = 55 \text{ kN}$

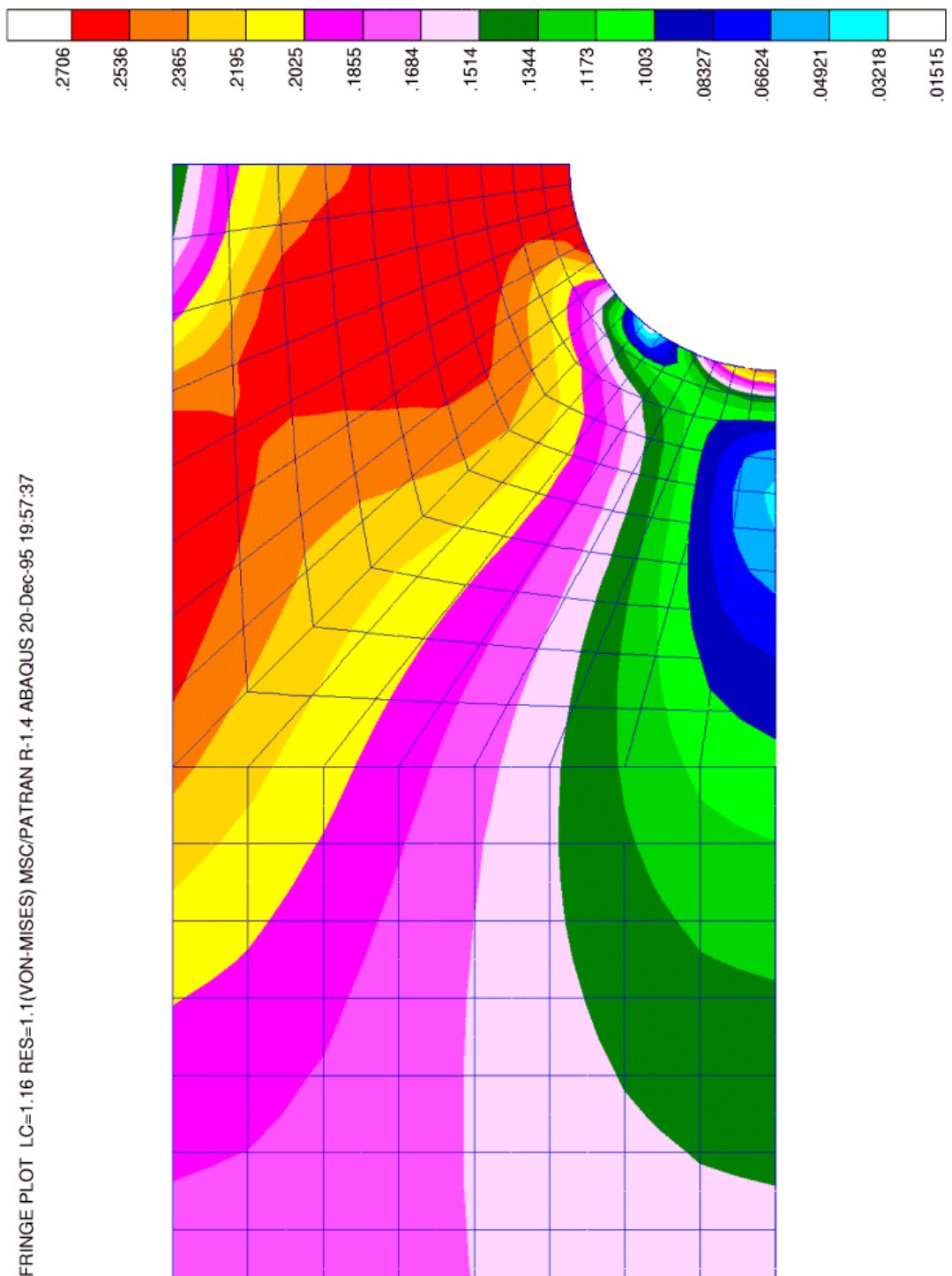


Bild A9. Spannungen aus FEM bei $F = 80 \text{ kN}$

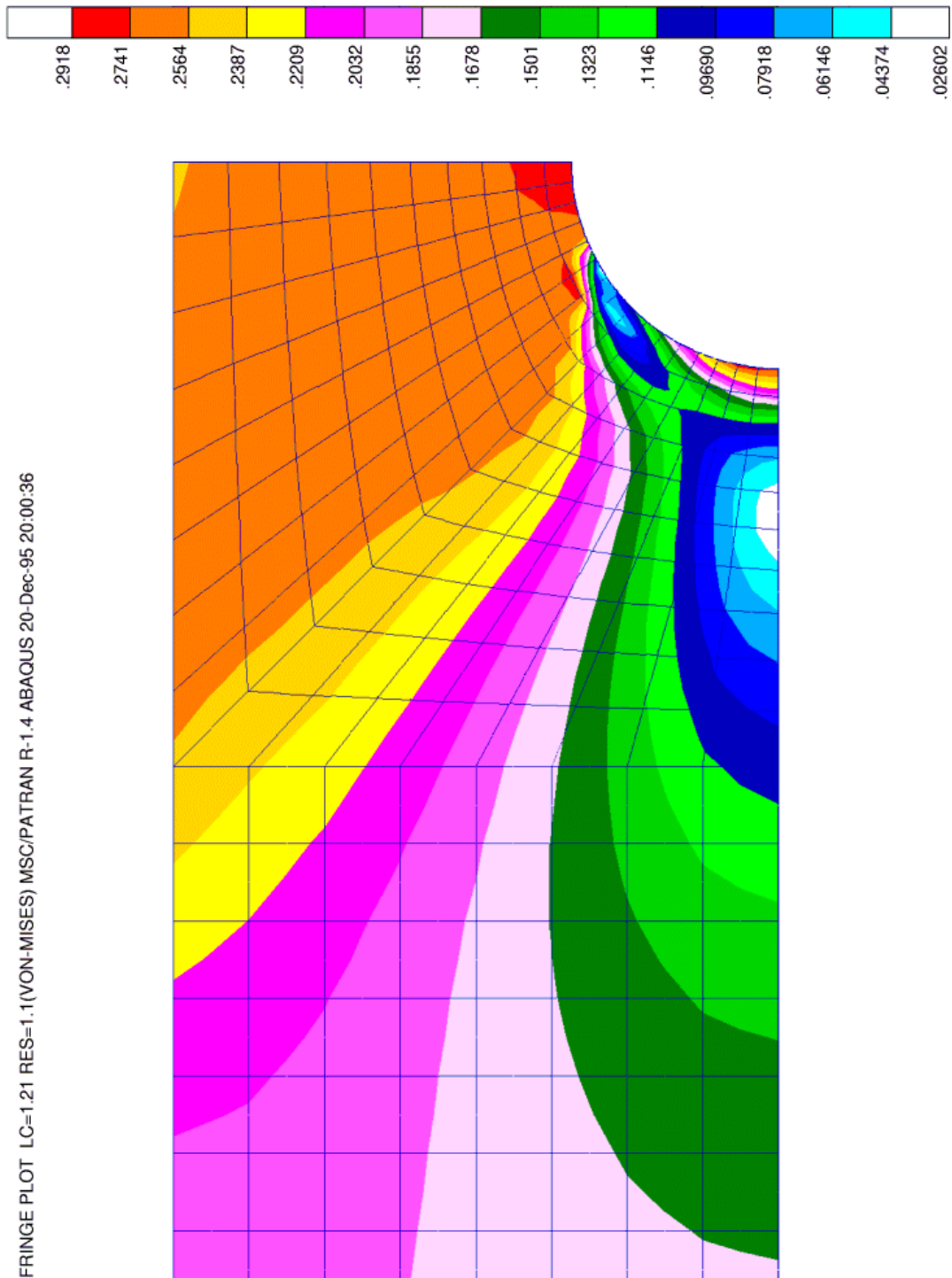


Bild A10. Spannungen aus FEM bei $F = 86 \text{ kN}$

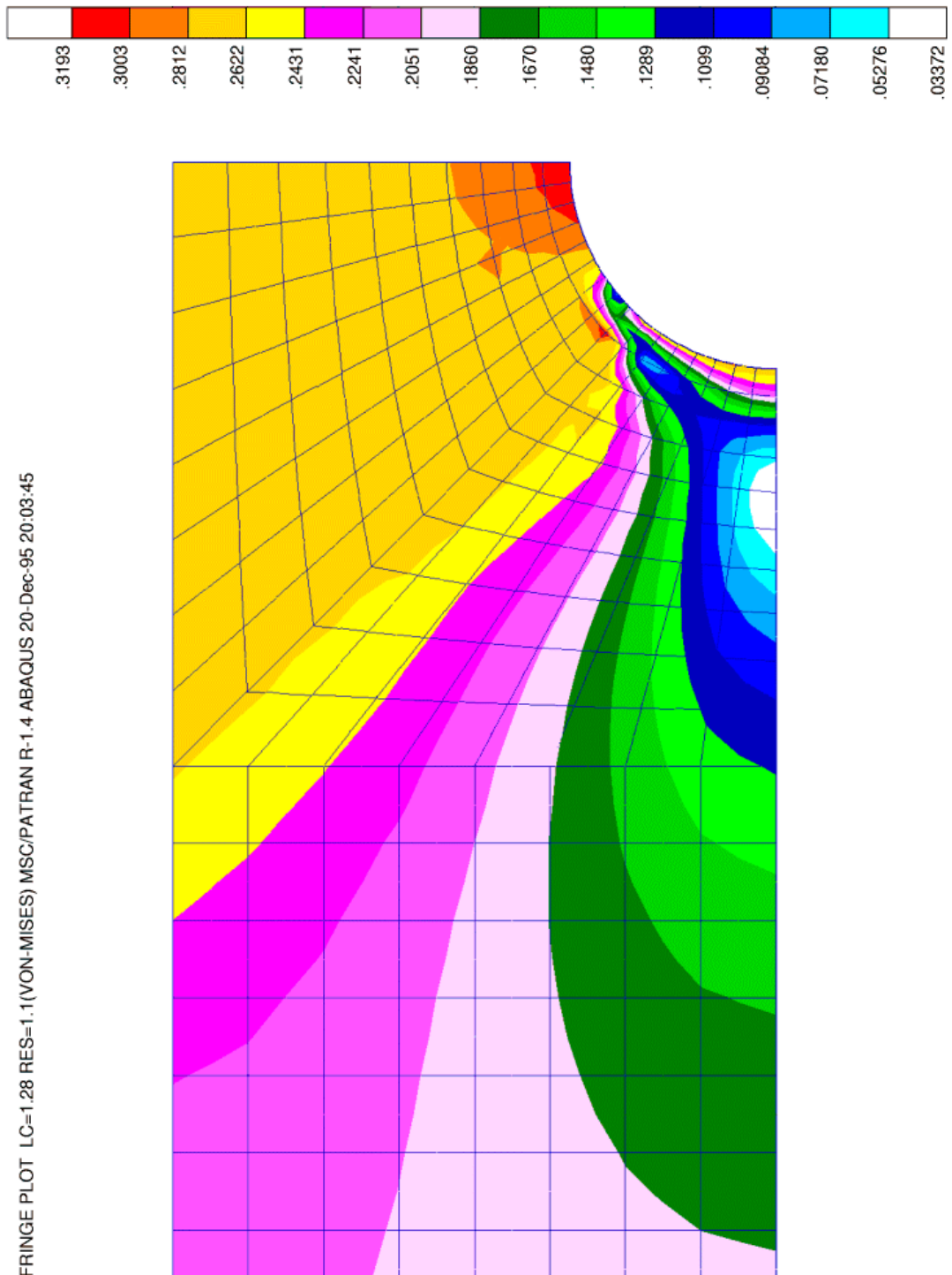


Bild A11. Spannungen aus FEM bei $F = 95 \text{ kN}$

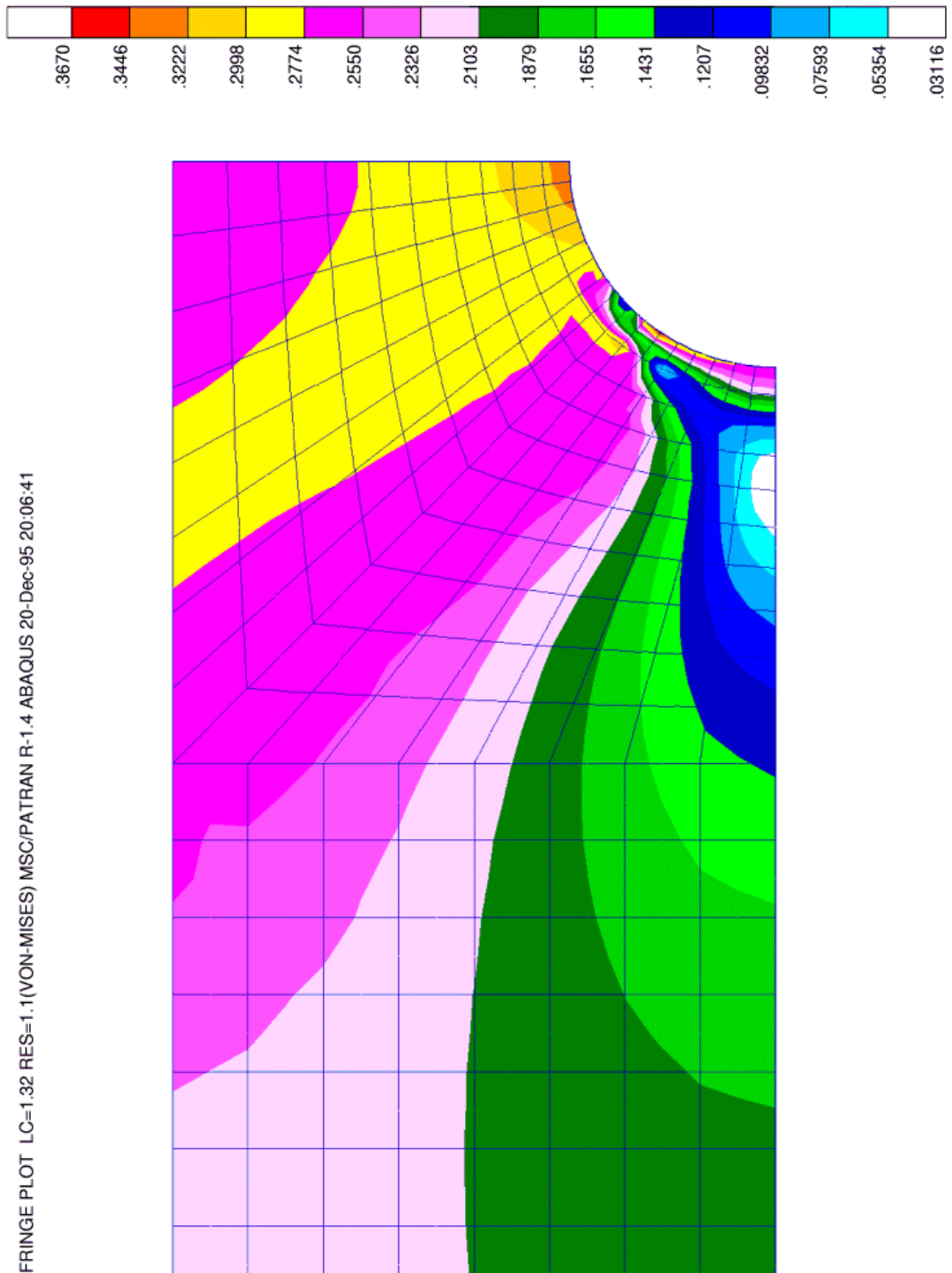


Bild A12. Spannungen aus FEM bei $F = 100 \text{ kN}$

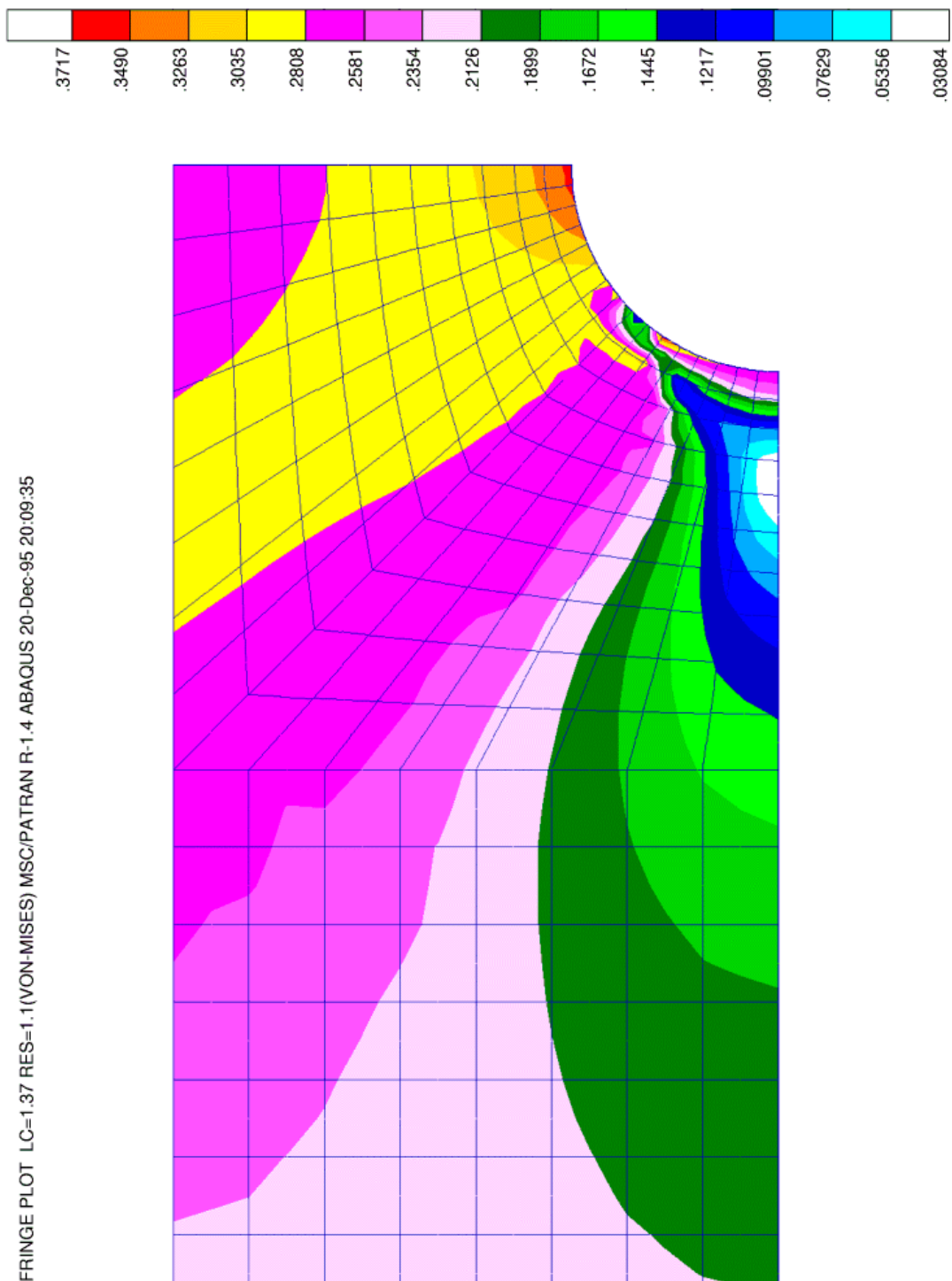


Bild A13. Spannungen aus FEM bei $F = 105\text{kN}$

A3. Materialkennwerte aus den Zugversuchen

Die Materialproben wurden aus den Probekörper der ersten Versuchsserie am Lehrstuhl Allgemeine Werkstofftechnik der BTU Cottbus durchgeführt. Die Bilder A14 – A17 zeigen die Ergebnisse der Zugproben.

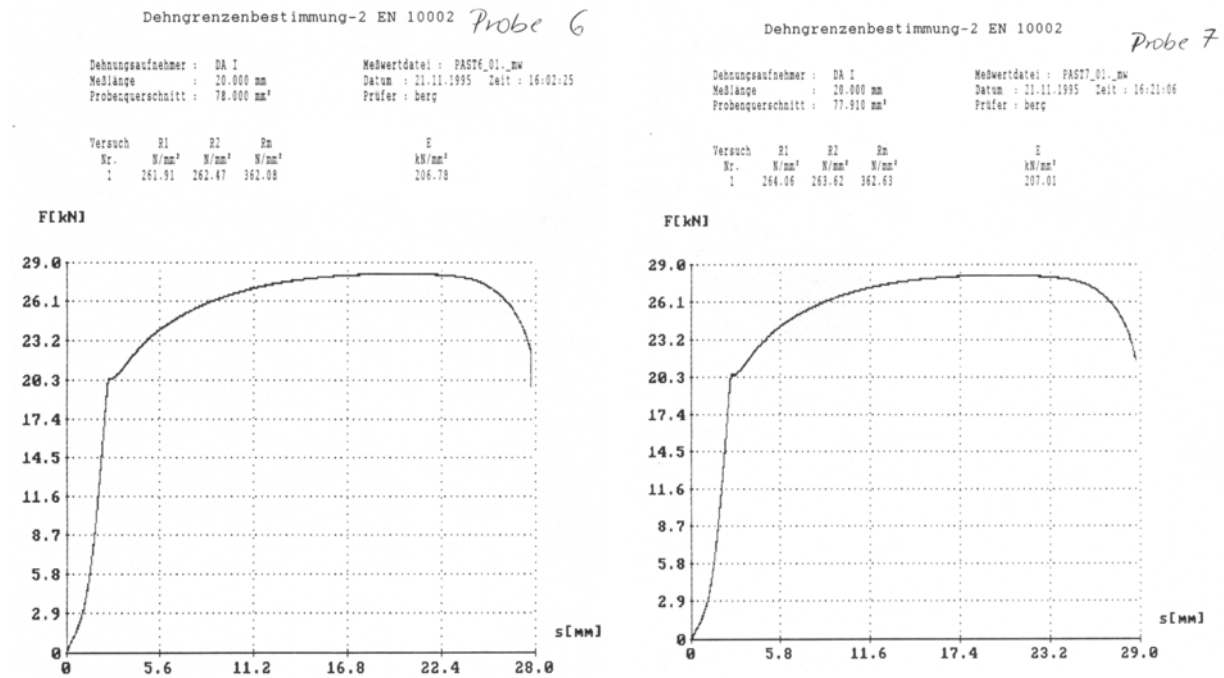


Bild A14. Zugproben aus dem Zugstab

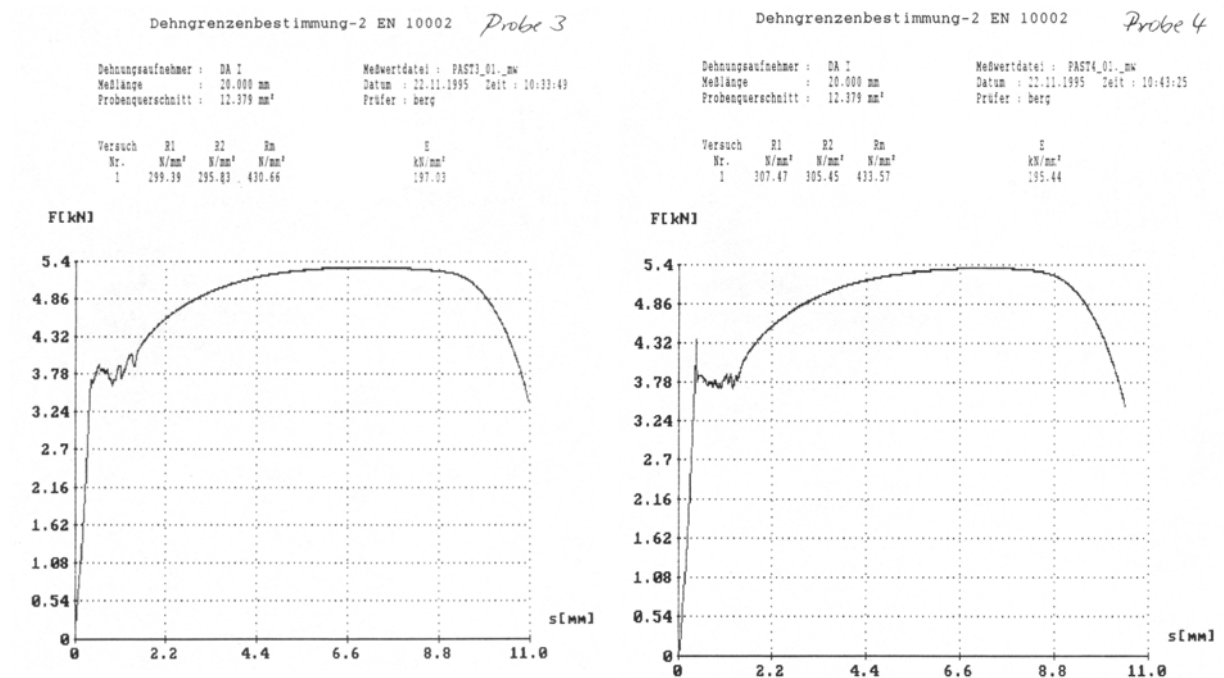


Bild A15. Zugproben aus dem Gurt des Walzträgers

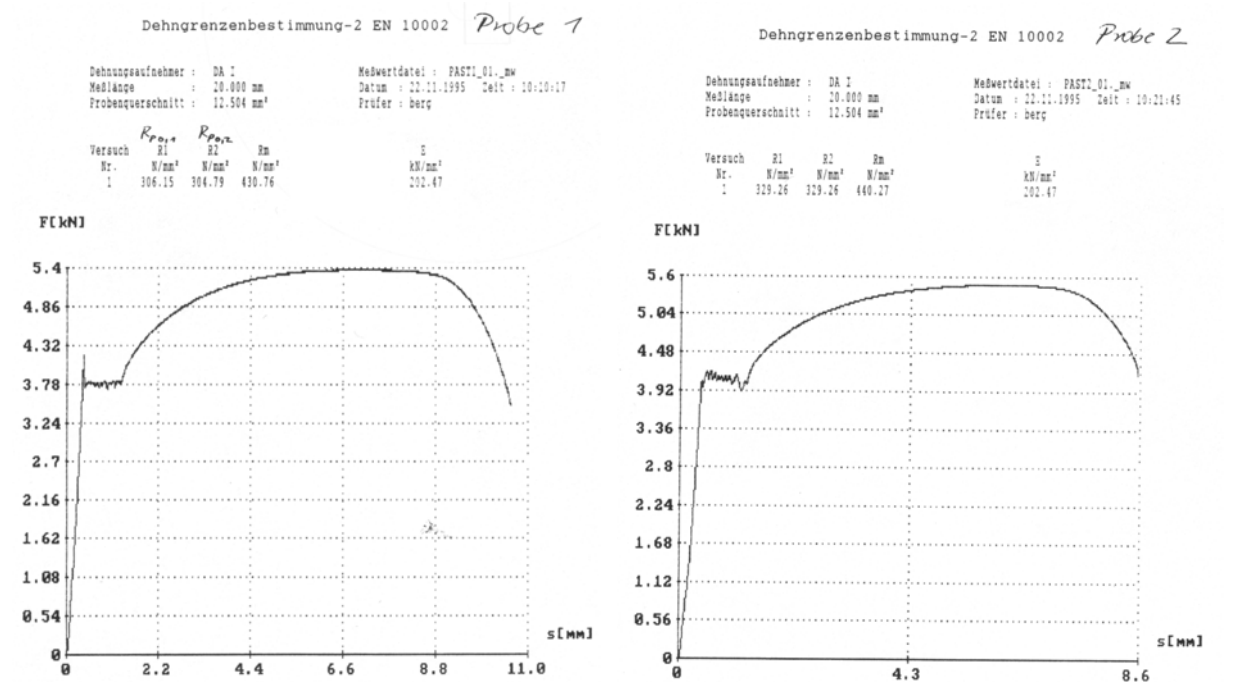


Bild A16. Zugproben aus dem Steg des Walzträgers

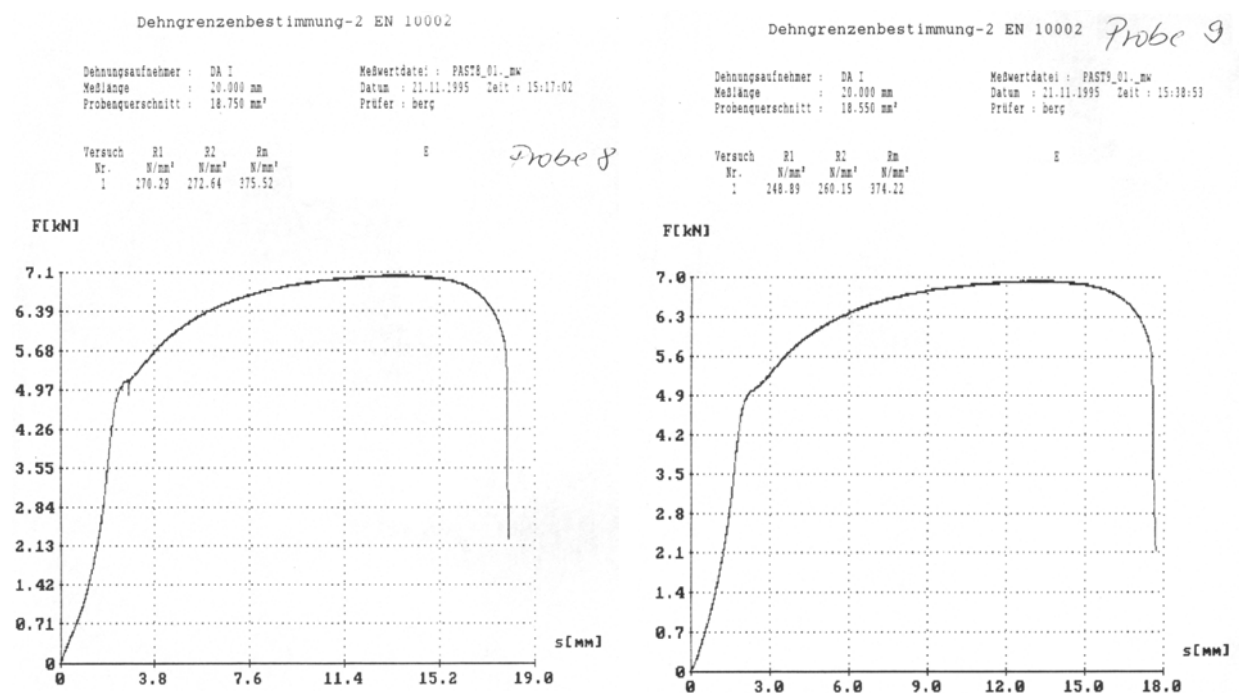


Bild A16. Zugproben aus dem Steg des Blechträgers

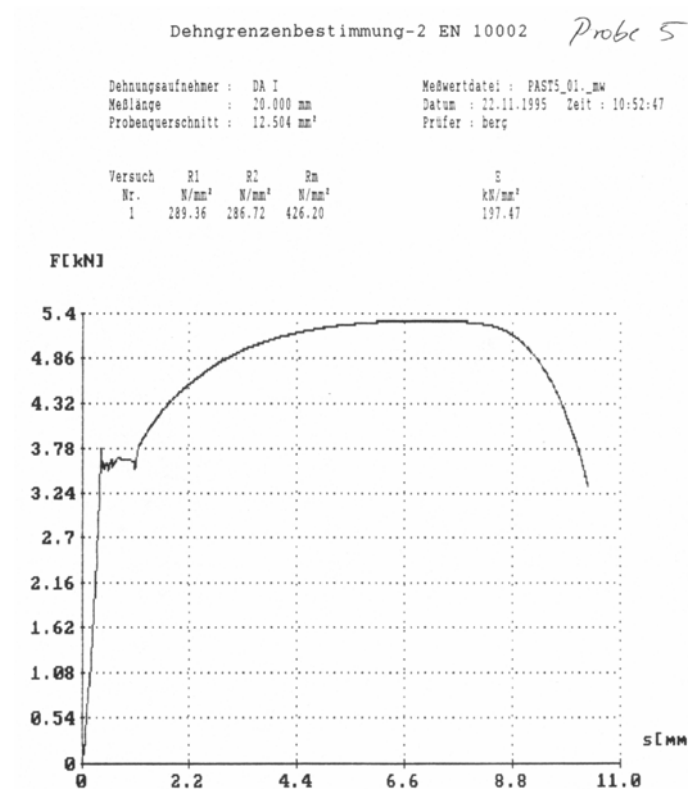


Bild A17. Zugprobe aus dem Gurt des Blechträgers

Die Zugproben aus den Probekörper der Rosetten-Verbindungen wurden an der Technischen Universität Helsinki, Finnland durchgeführt und nur die Materialkennwerte wurden bekannt gegeben.

